

# Experimente zum Strömungs- und Benetzungsverhalten von Fluiden im Hochscherratenbereich am Beispiel des Rakelprozesses

Experiments on the flow and wetting behaviour of fluids in the high shear rate range using the example of the doctor blading process

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Thorsten Bitsch aus Erbach i. Odw.

Tag der Einreichung: 06.08.2020, Tag der Prüfung: 04.11.2020

Darmstadt 2020

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

2. Gutachten: Apl. Prof. Dr. Ilia Roisman



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Institut für Druckmaschinen und Druck-  
verfahren  
Fachbereich Maschinenbau

Experimente zum Strömungs- und Benetzungsverhalten von Fluiden im Hochscherratenbereich am Beispiel des Rakelprozesses

Experiments on the flow and wetting behaviour of fluids in the high shear rate range using the example of the doctor blading process

Genehmigte Dissertation von Thorsten Bitsch aus Erbach i. Odw.

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

2. Gutachten: Apl. Prof. Dr. Ilia Roisman

Tag der Einreichung: 06.08.2020

Tag der Prüfung: 04.11.2020

Darmstadt 2020



---

Bitsch, Thorsten

*Experimente zum Strömungs- und Benetzungsverhalten von Fluiden im Hochscherratenbereich am Beispiel des Rakelprozesses*

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2021

URN der Dissertation: urn:nbn:de:tuda-tuprints-175897

Veröffentlicht unter: CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>



---

# Erklärung zur Dissertation

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 06.08.2020



---

(Thorsten Bitsch)



---

## Kurzfassung

---

Der Rakelprozess ist einer der wichtigsten Teilprozesse des Tiefdrucks. Den Tiefdruck zeichnet seine vergleichsweise hohen Druckgeschwindigkeiten und Reproduzierbarkeit aus. Die Rakel streift das Fluid von der Druckform, befüllt die Gravur der Druckform und befreit die nicht-druckenden Stellen des Druckformzylinders von Druckfluid. Dazu wird eine Rakel unter einem Rakelwinkel  $\theta$  an den Druckformzylinder angepresst. Die Rakelgeometrie und die Beschichtung der Rakel können variieren. Weiter haben Druckformzylinder unterschiedliche Gravurparameter, die möglicherweise den Rakelprozess und die Strömung an der Rakel beeinflussen. Im Rakelprozess treten Störungen auf, die von Einflussgrößen wie Rakelanpresskraft, Rakelgeschwindigkeit, der Kapillarzahl des Prozesses und des verwendeten Fluids abhängen. Dabei hat die Scherung des Fluids bei newtonschen und nicht-newtonschen Fluiden jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf den Rakelprozess, da sich die Viskosität der jeweiligen Fluide unterschiedlich verändert. Die Rakelanpresskraft führt dazu, dass sich ein effektiver Rakelwinkel  $\theta_{eff}$  einstellt, der kleiner als der eingestellte Rakelwinkel ist. Auf Grund mechanischer Abrasion entstehen Abriebpartikel, die in den Rakelprozess eingebracht werden und möglicherweise den Rakelprozess und das Druckergebnis beeinflussen. In der vorliegenden Arbeit wird die Konzeptionierung eines Rakelmessstands behandelt, der unterschiedliche Experimentanordnungen sowie die Beobachtung des Rakelprozesses mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ermöglicht. Ein transparenter Hohlzylinder und ein optisches Prisma ermöglichen die Beobachtung der Rakel aus dem Inneren des Zylinders. Eine  $\mu$ PTV-Methode wird damit möglich, um das Strömungsfeld an der Rakel aufzuklären.

---



---

## Abstract

---

The doctorblading process is one of the most important sub-processes in gravure printing. Gravure printing is characterized by its comparatively high printing speeds and reproducibility. The doctor blade strips the fluid from the printing forme, fills the engraving of the printing forme and frees the non-printing areas of the printing forme cylinder from printing fluid. To do this, a doctor blade is pressed against the printing forme cylinder at a doctor blade angle  $\theta$ . The doctor blade geometry and the coating of the doctor blade can vary. Further, printing forme cylinders have different engraving parameters that may affect the doctorblading process and the flow at the doctor blade. Disturbances occur in the doctorblading process that depend on influencing variables such as doctor blade contact pressure, doctor blade speed, the capillary number of the process and the fluid used. Shearing of the fluid has different effects on the doctorblading process for Newtonian and non-Newtonian fluids, since the viscosity of the respective fluids changes differently. The doctor blade contact force results in an effective doctor blade angle  $\theta_{eff}$  that is smaller than the set doctor blade angle. Due to mechanical abrasion, abrasion particles are generated and introduced into the doctoring process, possibly affecting the doctoring process and the printing result. This paper deals with the conceptual design of a doctor blade measurement stand that allows different experimental setups as well as observation of the doctor blade process with a high-speed camera. A transparent hollow cylinder and an optical prism allow observation of the doctor blade from inside the cylinder. A  $\mu$ PTV method thus becomes possible to elucidate the flow field at the doctor blade.

---

---

## Danksagung

---

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen beteiligten Personen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Zunächst möchte ich mich besonders bei Herrn Professor Dörsam für die solide Betreuung und die gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am IDD bedanken. Die ehrliche und auf Vertrauen basierende Kommunikation hat mir sehr viel Mut und Orientierung und immer wieder neue Ideen gegeben.

Mein Dank gilt auch Herrn Professor Ilja Roisman für das Zweitgutachten, sowie für die gute Zusammenarbeit innerhalb des Sonderforschungsbereichs 1194.

Meinem Gruppenleiter Dr. Hans Martin Sauer möchte ich für die tollen Gespräche danken, die meine Gedanken, Vorgehensweise und mein kritisches Denken stark geprägt haben.

Des Weiteren möchte ich mich beim Sonderforschungsbereich 1194 für die Aufnahme als assoziiertes Mitglied und die finanzielle Unterstützung bedanken. Ebenso gilt mein Dank den Partnern mit denen ich im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts POESIE am Standort InnovationLab GmbH in Heidelberg zusammenarbeiten durfte.

Auch dem IDD-Team möchte ich für die insgesamt sehr schöne Zeit danken. Es hat viel Spaß und Freude bereitet, gemeinsam mit Euch viele Herausforderungen zu meistern. Ich bin stolz darauf ein Teil dieses Teams gewesen zu sein.

Meinen Freunden in der ganzen Welt möchte ich danken, dass sie mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen und mich immer wieder mit aufbauenden Worten motiviert und unterstützt haben.

Vor allem möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir immer den Rücken frei gehalten und mich in jeder Lebenslage unterstützt haben. Dabei möchte ich den Dank ganz besonders an meine Eltern Wally und Horst richten, die mir eine tolle Ausbildung und ein Leben in Freiheit geschenkt haben. Meinem Bruder Christian und meiner Schwägerin Susanne möchte ich dafür danken, dass sie immer für mich da sind und mir ebenso in jeder Lebenslage zur Seite stehen.

---



---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung, Motivation, Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Motivation . . . . .	3
1.3	Zielsetzung der Arbeit . . . . .	5
1.4	Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Tiefdruck und Rakelprozess . . . . .	7
2.1.1	Tiefdruck allgemein . . . . .	7
2.1.2	Rakelprozess im Tiefdruck . . . . .	10
2.1.3	Rakelprozess im Tiefdruck . . . . .	14
2.1.4	Wichtige Begrifflichkeiten aus dem Tiefdruck-Rakelprozess . . . . .	14
2.1.5	Konventionelle Rakelsorten . . . . .	17
2.1.6	Material und Beschichtungen der Rakel . . . . .	17
2.1.7	Störungen des Rakelprozesses . . . . .	18
2.1.8	Rakelarten in anderen technischen Bereichen . . . . .	19
2.2	Mechanisches Rakelmodell . . . . .	22
2.3	Strömungen von Flüssigkeiten und ihre Beschreibung . . . . .	26
2.3.1	Viskosität, Schubspannung und innere Reibung . . . . .	26
2.3.2	Verschiedene Typen von Strömungen und dimensionslose Größen . . . . .	28
2.4	Stand der Forschung . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Experimentelle Vorgehensweise</b>	<b>38</b>
3.1	Rakelmessstand . . . . .	39
3.1.1	Konstruktiver Aufbau . . . . .	39
3.1.2	Zusätzliche Komponenten . . . . .	47
3.1.3	Transparenter Hohlzylinder . . . . .	49
3.2	Verwendete Messtechnik . . . . .	51
3.2.1	Hochgeschwindigkeitskamera . . . . .	51
3.2.2	Verwendete Optiken . . . . .	52
3.2.3	Verwendete Lichtquelle . . . . .	52
3.3	Gesamter Experimentaufbau . . . . .	53
3.3.1	Mögliche Experimentanordnungen und -kategorien . . . . .	55
3.4	Durchführung der Experimente . . . . .	57
3.4.1	Bestimmung der dynamischen Viskosität der verwendeten Fluide . . . . .	58

---

---

3.4.2	Einfluss der Rakelanpresskraft . . . . .	61
3.4.3	Einfluss der Fluidviskosität auf den Rakelprozess . . . . .	62
3.4.4	Einfluss der Tiefdruck-Gravur auf den Rakelprozess . . . . .	63
3.4.5	Einfluss der Kapillarzahl auf den Rakelprozess . . . . .	64
3.4.6	Übersicht der Experimente . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Auswertung und Ergebnisse</b>	<b>70</b>
4.1	Einfluss der Rakelanpresskraft auf die Rakel . . . . .	70
4.2	Bestimmung der Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs . . . . .	76
4.3	Einfluss der Fluidviskosität auf den Rakelprozess . . . . .	77
4.4	Einfluss der Tiefdruck-Gravur auf die Tropfenbreite unter der Rakel . . . . .	81
4.4.1	Untersuchung zum Drip-Off-Effekt . . . . .	84
4.5	Einfluss der Kapillarzahl auf die Tropfenbreite unter der Rakel . . . . .	88
4.6	Zusätzliche Beobachtungen mit transparentem Hohlzylinder . . . . .	98
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>101</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>114</b>
A.1	Experimentelle Daten . . . . .	114
A.1.1	Daten zur Variation der Fluidviskosität . . . . .	114
A.1.2	Daten zum Einfluss der Kapillarzahl . . . . .	115
A.1.3	Daten zum Einfluss der Gravurparameter . . . . .	118
A.2	Datenblätter . . . . .	120
A.2.1	Silikonöle . . . . .	120

---

## Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit (SI)
$a$	Beschleunigung	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$A$	Kontaktzonenfläche	$\text{m}^2$
$b$	Breite der Kontaktzone	$\text{m}$
$B_{Blade}$	Rakelzahl	-
$Bo$	Bondzahl	-
$Ca$	Kapillarzahl	-
$d_S$	Rakeldicke	$\text{m}$
$D$	Höhe des Rakelkanals	$\text{m}$
$\vec{e}_1$	Einheitsvektor von $\vec{v}_B$	$\text{m}$
$f$	Abstand bewegter Oberfläche zum Drehpunkt	$\text{m}$
$F$	Kraft	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$\vec{F}_n$	Normalkraft	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$\vec{F}_t$	Tangentialkomponente von $\vec{F}$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$\tilde{F}$	Rakelanpresskraft	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
$g$	Erdbeschleunigung	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$L$	Rakelbreite	$\text{m}$
$\vec{n}$	Normalenvektor der bewegten Oberfläche	$\text{m}$
$p$	Druck	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
$P$	Drehpunkt	-
$r_{fill}$	Füllhöhe des Fluidmeniskus	$\text{m}$
$Re$	Reynoldszahl	-
$\vec{v}_B$	Rakelgeschwindigkeit	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$V$	Volumen	$\text{m}^3$
$W$	Länge der Rakel	$\text{m}$
$We$	Weberzahl	-
$z$	Abstand	$\text{m}$
$\eta$	dynamische Viskosität	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
$\eta_{kin}$	kinematische Viskosität	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\dot{\gamma}$	Scherrate	$\text{s}^{-1}$
$\rho$	Dichte	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\sigma$	Oberflächenspannung	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
$\theta$	Rakelwinkel	Grad
$\theta_{eff}$	effektiver Rakelwinkel	Grad
$\Theta$	Maximalwinkel des Rakelwinkels $\theta$	Grad

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

Abkürzung	Bezeichnung
CAD	computer-aided design
DMS	Dehnmessstreifen
IDD	Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
EA	Experimentanordnung
EK	Experimentkategorie
PEN	Polyethylennaphtalat
PGMEA	Propylenglykolmonomethylacetat
PEG	Polyethylenglykol
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmetacrylat
PLA	Polylactid
POE	printed organic electronics
PTFE	Polytetrafluorethylen
TUD	Technische Universität Darmstadt
μPTV	microscopic particle tracking velocimetry

---

# 1 Einleitung, Motivation, Zielsetzung

---

## 1.1 Einleitung

---

Druckverfahren haben seit hunderten von Jahren für die menschliche Zivilisation eine unschätzbare Bedeutung. Beim Drucken sollen Informationen auf einen Bedruckstoff übertragen, vervielfältigt und konserviert werden. Klassischerweise werden Texte und Bilder auf Papier, Textilien oder Folien gedruckt, allerdings ist die Familie der möglichen Bedruckstoffe deutlich größer. Es gibt auch verschiedene Druckverfahren, die jeweils eine eigene technische Bedeutung haben und für unterschiedliche Anwendungen geeignet sind.

Das besondere an den meisten Druckverfahren ist, dass man sie zwar in der Anwendung beherrscht, diese jedoch wissenschaftlich noch großes Forschungspotential aufweisen. Das Funktionsprinzip jedes Druckverfahrens ist jeweils sehr unterschiedlich. Diese Arbeit konzentriert sich auf den Tiefdruck, der von allen Druckverfahren die höchste Reproduzierbarkeit und Druckgeschwindigkeiten aufweist (vgl. Kipphan (2000)). Im Tiefdruck, präziser, im Rakeltiefdruck, können moderne Maschinen eine Bedruckstoff-Bahn mit einer Bahngeschwindigkeit in der Größenordnung von  $\approx 15 \text{ ms}^{-1}$  bedrucken. Im weiteren Teil der Arbeit soll unter Tiefdruck immer der Rakeltiefdruck verstanden werden. Der Rakeltiefdruck zeichnet sich dadurch aus, dass die Druckform aus einem metallischen Zylinder besteht, in den Vertiefungen eingraviert sind und mit dem im rotativen Prozess Druckfluid durch Kontakt auf einen Bedruckstoff (Substrat) übertragen wird. Die Druckform (hier: der Druckformzylinder) wird mit Fluid (z.B. Farbe) zwangsbenetzt, um die genannten Vertiefungen mit Fluid zu füllen, welches abgedruckt werden soll. Einer der wichtigsten Teilprozesse innerhalb des Tiefdruckverfahrens ist der Rakelprozess, der auch als die „Seele des Tiefdrucks“ bezeichnet wird (vgl. Kipphan (2000)).

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem *Rakelprozess am konkreten Beispiel des Rakeltiefdrucks*. Es handelt sich damit um einen Teilprozess eines Druckverfahrens. Auf der Druckform existieren die gravierten Bereiche, die adäquat und reproduzierbar mit Farbe befüllt werden sollen. Diese Bereiche sollen bei jedem Druckvorgang immer die gleiche Menge an Druckfluid fassen und während des Druckprozesses das eigentliche Druckbild auf das zu bedruckende Substrat übertragen. Beim Tiefdruck geschieht das bei jeder Umdrehung des Druckformzylinders. Die restlichen, nicht druckenden Bereiche müssen von dem Fluid befreit werden. Dazu wird das Fluid von der Druckform *abgerakelt*. Im Tiefdruck wird an den rotierenden Druckformzylinder eine, in der Regel aus Metall bestehendes Metallband, dem *Rakelmesser* (oder *Rakelklinge*, oder *Rakel*) an den Druckformzylinder unter einem Winkel und Kraft, dem *Rakelwinkel* und der *Rakelanpresskraft*, angepresst und das überschüssige Fluid abgestreift. Dieser Prozess wird *Rakelprozess* genannt. Das Fluid wird an der Rakel stark geschert und staut sich zu einem Fluidmeniskus auf. Der sich vor der Rakel aufstauende Fluidmeniskus benetzt auf der gesamten Breite

---

die Druckform. Da es sich bei vielen Druckfluiden um nicht-newtonsche Fluide handelt, können hier Effekte wie Scherverdünnung und Scherverdickung das Einfärbeverhalten der Druckform entscheidend beeinflussen. Das Besondere an dem Prozess ist, dass er auf den ersten Blick sehr einfach zu verstehen erscheint, jedoch durch die hohen Geschwindigkeiten, Reibungseffekte und die dadurch entstehende Fluidodynamik ein sehr komplexes und noch unzureichend untersuchtes Forschungsgebiet darstellt. Die Schwierigkeit der Untersuchung des Rakelprozesses im Tiefdruck besteht aus dem Zusammenspiel vieler Phänomene, die vermutlich ihre Ursache in den extremen kleinen Zeit- und Längenskalen und der wechselseitigen Beeinflussung der klassischen Kontaktmechanik und der komplexen Fluidodynamik haben.

Der Rakelprozess ist ein technisch beherrschbarer Prozess, für den der Bediener Erfahrung benötigt, um den Prozess über lange Druckzeiten und hohen Geschwindigkeiten stabil zu halten. Entstehen Fehldrucke, weil die Druckform beispielsweise ungleichmäßig abgerakelt wird, so führt dies zwangsläufig zu Produktionsausschüssen und -unterbrechungen in der Druckindustrie. Der Bediener muss die Rakel, die Einstellungen der Druckmaschine und das verwendete Druckfluid immer aufeinander abstimmen. Aus diesem Grund hat sich für die Herstellung von Rakelmessern eine eigene Industriesparte entwickelt, die mit Innovationen und einer großen Variation an unterschiedlichen Rakelprodukten den optimalen Rakelprozess erreichen wollen. Dabei werden Geometrie, Material und auch Beschichtungen der Rakel unterschiedlich kombiniert, dass für möglichst jede Konfiguration des Druckprozesses die passende Rakel gefunden werden kann. Werden in diesem Prozessschritt bestimmte Parameter ungünstig eingestellt, so können im späteren Druckbild Streifen, Spritzer, Fehlstellen oder andere Störeffekte auftreten. Auch kann der Druckform- oder Rakelverschleiß zu hoch sein. Dies soll unbedingt vermieden werden. Im funktionalen Druck, wie etwa in der gedruckten Elektronik, können Störungen im Druckbild, sowie der entstandene Abrieb zum vollständigen Funktionsversagen des Druckproduktes führen. Es sollen neue Wege gefunden werden den Rakelprozess zu erforschen und besser zu verstehen. Einer dieser neuen Wege ist der Einsatz von Messtechnik und Datenverarbeitung wie sie erst gegen Ende des 20. Jahrhunderts entstanden sind. Dies gilt auch für andere Disziplinen und wurde in einem Standardlehrbuch der Physik treffend wie folgt formuliert:

---

**Zitat:**

„,Wenn ich in den Himmel kommen sollte‘, sagte im Jahre 1932 Horace Lamb, Altmeister der Hydrodynamik und Autor eines klassischen Werkes darüber, ‚erhoffe ich Aufklärung über zwei Dinge: Quantenelektrodynamik und Turbulenz. Was den ersten Wunsch betrifft, bin ich ziemlich zuversichtlich.‘ Tatsächlich verstehen wir viel besser, wie sich ein schwarzes Loch bildet, als wie schnell das Wasser aus einem Hahn strömt. Es gibt hier nur empirische Formeln, die sich nicht ohne Zwang auf die Grundgesetze zurückführen lassen. Schuld ist bestimmt nicht der Mangel an Interesse für dieses praktisch so wichtige Gebiet, auf dem Leute wie Reynolds, Prandtl, Heisenberg, Landau gearbeitet haben. Erst in letzter Zeit scheint einiges Licht aus einer ganz unerwarteten Ecke zu kommen, nämlich der Spielerei mit Computern, bei der jeder auch ohne große Vorkenntnisse fundamental Neues entdecken kann, falls er genügend Spürsinn und Geduld hat.“

(entnommen aus Meschede (2006))

Experimente, die noch vor wenigen Jahrzehnten nur mit erheblichem Aufwand und Kosten möglich gewesen sind, können heute mit einem deutlich kleineren Aufwand durchgeführt werden. Die heute verfügbare Elektronik und Dateninfrastruktur erlaubt die Erfassung und Analyse von digitalen Messdaten wie sie vor wenigen Jahrzehnten undenkbar gewesen wäre. Es gibt daher unterschiedliche theoretische und experimentelle Ansätze, die sich mit dem Rakelprozess auseinandersetzen, aber bisher zu keinem vollständigen Verständnis des Rakelprozesses geführt haben. In dieser Arbeit wird eine eigens entwickelte Versuchsplattform (der sogenannte *Rakelmessstand*) vorgestellt, die die experimentelle Untersuchung des Rakelprozesses mit Hochgeschwindigkeits-Kameratechnik ermöglicht.

---

## 1.2 Motivation

---

In diesem Kapitel wird die Motivation hinter der vorliegenden Arbeit erläutert. Entsprechend der wissenschaftlichen Methode wird in diesem Abschnitt eine wissenschaftliche Fragestellung formuliert, die in der Arbeit behandelt werden soll. Wie zuvor beschrieben, zeichnet sich der Tiefdruck vor allem durch seine hohe Reproduzierbarkeit und Produktionsgeschwindigkeiten aus. Für grafische Druckerzeugnisse, die eine hohe Druckqualität aufweisen sollen, wird der Tiefdruck daher oft als beliebtes Produktionsverfahren verwendet, obwohl er zu den eher aufwendigeren Druckverfahren zählt. Dies liegt daran, dass vor und während der Durchführung einer Druckproduktion viele unterschiedliche Arbeitsprozesse (wie z.B. Druckformherstellung oder Rakeleinstellung) durchgeführt werden müssen. Das bedeutet, dass man in einer echten Produktionsstätte für Tiefdruckerzeugnisse viel Personal mit technischem Fachwissen und einer

---

vergleichsweise aufwendigen Grundausstattung an Maschinen und Material benötigt. Dies ist für die Druckindustrie wirtschaftlich rentabel, da der Tiefdruck in kurzer Zeit vergleichsweise viele Druckerzeugnisse mit sehr hoher Präzision ausstoßen kann. Allerdings können auch im Tiefdruck Effekte auftreten, die zu Druckfehlern führen, also das Druckergebnis nicht dem gewünschten Ergebnis entspricht.

Im grafischen Druck, also alle Druckerzeugnisse, die eine rein visuelle Funktion (Zeitschriften, Etiketten usw.) besitzen, fallen dem Endanwender kleinere Druckfehler bei weniger hochwertigen Druckerzeugnissen wie beispielsweise Tageszeitungen oder Lebensmittelverpackungen möglicherweise nicht auf, da sie möglicherweise für das bloße menschliche Auge nicht zu erkennen sind oder die Qualität des Druckerzeugnisses von eher geringerer Bedeutung ist. Bei aufwendigeren grafischen Druckerzeugnissen, die zum Beispiel von Hochglanzzeitschriften bis zu hochwertigen Verpackungen von Luxusartikeln reichen, ist eine Vermeidung von Ausschuss im Produktionsprozess ein Hauptziel.

Es existieren auch Druckerzeugnisse, die weitere Funktionen als nur die visuelle Makellosigkeit erfüllen. So kann das Druckerzeugnis auch biologische, chemische, elektronische, thermische oder mechanische Eigenschaften besitzen. Dies ist der Fall, wenn das Druckerzeugnis sich auf Grund einer Umgebungsänderung auch verändert, also zum Beispiel unter Temperaturänderung die Farbe verändern kann. Bei funktionalen Druckerzeugnissen werden an den Tiefdruck weitere Anforderungen gestellt, wie die Erzeugung sehr dünner, möglicherweise nicht mehr sichtbaren gedruckten Materialfilme. Allerdings können kleinste ungewünschte Druckfehler zur Unbrauchbarkeit des gesamten Druckerzeugnisses führen. Dies lässt sich leicht veranschaulichen, wenn man sich vorstellt, dass eine Fehlstelle in einer gedruckten Leiterbahn zum Verlust der Funktion der Leiterbahn führt. Deshalb ist es gerade bei funktionalen Druckerzeugnissen, wie beispielsweise der gedruckten organischen Elektronik sehr wichtig, möglichst Druckfehler zu vermeiden, da hier vor allem oft sehr teure und seltene Materialien mit bestimmten Anforderungen und Eigenschaften verwendet werden. (vgl. Nisato, Lupo, Ganz (2016))

Alleine im Rakelprozess können Störeffekte auftreten, die zu einer Verminderung der Druckqualität und zu Druckfehlern bis hin zum Produktionsausschuss führen können. Diese Störeffekte oder Artefakte sind weitläufig bekannt, jedoch existiert kaum ein technisches oder physikalisches Verständnis dafür unter welchen Bedingungen diese auftreten. In der Realität wird in der Produktion der Rakelprozess auf Basis von Erfahrungswerten des Bedieners durchgeführt und so Fehler im Rakelprozess möglichst vermieden. Kleinste Veränderungen im Produktionsablauf im Tiefdruck können zu Störeffekten an der Rakel führen. Aus diesem Grund ist es die Hauptmotivation dieser Arbeit sich mit den Bedingungen und der Funktionsweise des Rakelprozesses im Tiefdruck zu beschäftigen, nicht nur um Störeffekte im Rakelprozess zu vermeiden, sondern ebenfalls eine Methode zu entwickeln, die Untersuchungsmöglichkeiten für den Rakelprozess im Tiefdruck bieten.



---

### 1.3 Zielsetzung der Arbeit

---

Die wissenschaftliche Fragestellung behandelt die physikalischen Vorgänge, die an der Rakel im Tiefdruck stattfinden. Der Rakelprozess wird durch verschiedene Parameter gesteuert und kontrolliert. Die Strömung vor, unter und hinter einer Rakel ist zwar auf theoretischer Ebene bereits vielfach untersucht worden, jedoch existieren auf diesem Feld kaum experimentelle Daten und es werden stets starke Vereinfachungen gemacht. (vgl. Moffatt (1963), Strauß (1975))

Ziel ist es mit moderner Messtechnik neue Möglichkeiten zu erschließen den Rakelprozess, wie er im Tiefdruck in der Praxis vorkommt, zu untersuchen und zu beschreiben. Bei der Durchführung von Experimenten sollen der Einfluss dieser Parameter und Einflussgrößen untersucht werden. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf

- Einfluss der Rakelanpresskraft
- Einfluss der Fluidviskosität
- Einfluss der Gravurparameter
- Einfluss und Bedeutung der Kapillarzahl

Es soll untersucht werden, wie das Fluid eine Tiefdruckform benetzt und welche Effekte auf Grund des stark gescherten Fluids auftreten können. Diese Arbeit ist der Versuch den Rakelprozess unter Bedingungen wie sie im praktischen Tiefdruck vorkommen (z.B. reale Druckform, realitätsnahe Geschwindigkeiten) experimentell untersuchen zu können und welche Herausforderungen dabei eine Rolle spielen. Dabei sollen die Ergebnisse und Beobachtungen im Kontext vorheriger wissenschaftlichen Arbeiten zum selben Thema betrachtet und diskutiert werden.

---

## 1.4 Aufbau der Arbeit

---

In Kapitel 2 werden die Grundlagen theoretischen Grundlagen der Arbeit behandelt. Zunächst wird der Tiefdruck kurz beschrieben und der Rakelprozess innerhalb des Tiefdrucks eingeordnet. Hierbei werden Begrifflichkeiten definiert und typische Phänomene des Rakelprozesses beschrieben. Weiter wird ein mechanisches Rakelmodell eingeführt und die an der Rakel wirkenden Kräfte diskutiert. Es wird eine Übersicht über die bisherigen experimentellen und theoretischen Arbeiten zum Rakelprozess im Tiefdruck präsentiert.

In Kapitel 3 werden Experimente, ihre Durchführung und die verwendeten Werkzeuge und Methoden dargestellt. Es wird ein Rakelmessstand, die verwendete Messtechnik sowie weiteres zusätzliche Komponenten für die Experimentanordnung beschrieben. Die Experimente werden mitsamt Experimentparametern in jedem Teilabschnitt aufgeführt.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der in Abschnitt 3 beschriebenen Experimente präsentiert und ausgewertet. Dabei wird zunächst in Abschnitt 4 Beobachtungen qualitativ beschrieben. Anschließend werden die Einflüsse der Rakelanpresskraft, der Fluidviskosität, der Kapillarzahl und der Gravurparameter quantitativ ausgewertet.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse aus dem vorherigen Kapitel diskutiert und mit den Ergebnissen aus der Literatur verglichen. In diesem Abschnitt wird die eigene Vorgehensweise und die eingesetzten Methoden abschließend bewertet.

In Kapitel 6 wird die Arbeit kurz zusammengefasst, ein persönliches Fazit gezogen und daraus ein Ausblick abgeleitet.

---

## 2 Grundlagen

---

Das Kapitel 2 beinhaltet den Grundlagenteil der vorliegenden Arbeit. Dem Leser soll so die Möglichkeit geboten werden die Vorgehensweise und Schlussfolgerungen verstehen zu können. Zunächst werden der Tiefdruck und die Verortung des Rakelprozesses im Tiefdruck behandelt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Dem Leser sollen die Grundlagen über den Tiefdruck und die Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Drucktechnik und des Rakelprozesses näher gebracht werden. Weiter wird in Abschnitt 2.4 eine Zusammenfassung über wissenschaftliche Arbeiten der vergangenen Jahrzehnte mit ähnlichen Fragestellungen präsentiert, um dem Leser einen Überblick über die Motivationen und Vorgehensweisen zur Untersuchung des Rakelprozesses im Tiefdruck zu liefern. Weiter werden die physikalischen Grundlagen zur Beschreibung von Strömungen kurz zusammengefasst und präsentiert.

---

### 2.1 Tiefdruck und Rakelprozess

---

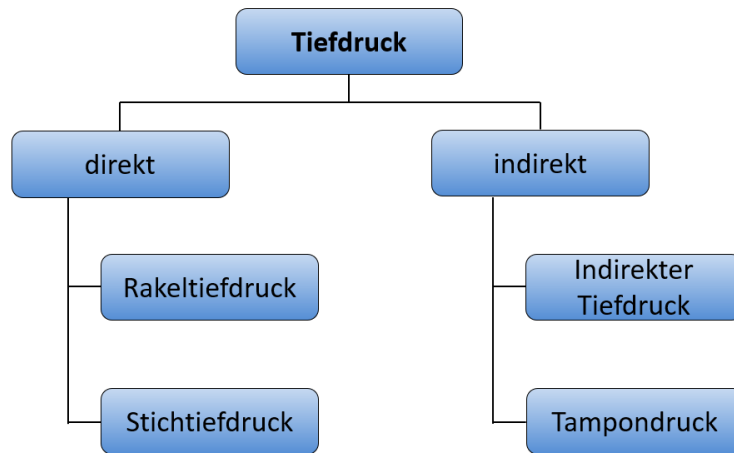
Bei dem Tiefdruck handelt es sich um ein Druckverfahren. Druckverfahren zeichnen sich klassisch dadurch aus, dass Information in Bild und Schrift grafisch auf einen Körper (Substrat) übertragen werden und die Information auf diese Weise konserviert wird. Dieser Teilabschnitt behandelt die Funktionsweise des Tiefdrucks etwas tiefer und ordnet den Rakelprozess innerhalb des Druckverfahrens ein.

---

#### 2.1.1 Tiefdruck allgemein

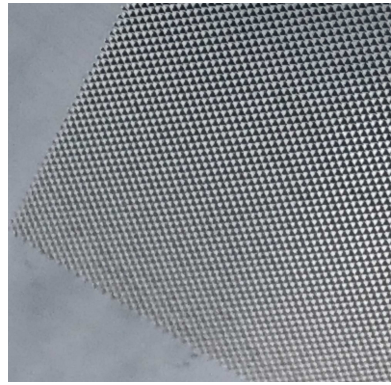
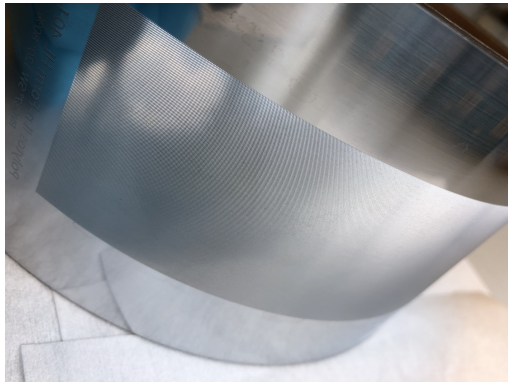
---

Das Tiefdruckverfahren zählt zu einem der ältesten Druckverfahren in der Menschheitsgeschichte. Es gilt heutzutage als ein vergleichsweise aufwändiges, jedoch hochpräzises Massenproduktionsverfahren. Das Wort *Tiefdruck* umfasst eine ganze Familie von Tiefdruckverfahren, die in ihrer Funktionsweise Ähnlichkeiten aufweisen. Abbildung 1 zeigt die Unterteilung des Tiefdrucks in indirekte und direkte Tiefdruckverfahren. Diese Arbeit behandelt den in Abbildung 1 aufgeführten *Rakeltiefdruck*. Der Unterschied zwischen beiden Verfahren besteht darin, dass beim indirekten Tiefdruckverfahren das Druckfluid von der Tiefdruckform erst auf ein Zwischenmedium übertragen wird, welches schließlich das Fluid erst auf das zu bedruckende Substrat überträgt.



**Abbildung 1:** Einteilung des Tiefdrucks in untergeordnete Tiefdruckverfahren (entnommen aus Kipphan (2000))

Das Grundprinzip aller Tiefdruck-Technologien besteht, daher auch der Name, in der Einbringung von kleinen Vertiefungen, den sogenannten *Näpfchen*, in eine Druckform, die somit ein gewisses Fluidvolumen im Nano- bis Mikroliter-Bereich fassen können. Diese werden in die Druckform eingraviert, weshalb diese im Folgenden von *Gravuren* genannt werden. Abbildung 2 zeigt exemplarisch ein Tiefdruckform-Sleeve mit gravierten und ungravierten, glatten Bereichen. Durch die Form und Tiefe der Gravuren wird das Fluidvolumen kontrolliert welches genau an dieser Position auf das Substrat übertragen wird. Es können pro Näpfchen einzelne gerasterte Bildpunkte übertragen, also gedruckt, werden, sodass durch die Feinheit der Punkte ein flächiger Farbeindruck entsteht. Es können aber auch durchgehende Schichten erzeugt werden. Die Schichtdicke wird ebenfalls über das von der Gravur fassende Fluidvolumen gesteuert. Dieses Grundprinzip der Druckfluiddosierung mittels gravierten Vertiefungen vereint alle Tiefdruckverfahren. Die dabei verwendeten Materialien und Techniken haben sich im Laufe der Zeit stets weiterentwickelt. Sowohl für die Verarbeitung der Materialien, die Druckformherstellung, als auch den eigentlichen Druckprozess haben sich im Laufe der Zeit verschiedenste Techniken entwickelt, die im Folgenden kurz dargestellt werden sollen.



**Abbildung 2:** Links: Auf der Seite liegende Druckform mit gravierten Fläche in der Mitte. Rechts: vergrößerter Ausschnitt der gravierten Fläche mit sichtbarer Gravur

Die ersten europäischen Kupferstiche stammen aus dem 15. Jahrhundert und wurden vor allem im Buchdruck für die Bebilderung verwendet. Im klassischen Kupferstich wird mit einem Stahlstichel das Druckbild in eine glatte Kupferplatte geritzt, weshalb der Kupferstich auch zu den Tiefdruckverfahren zählt. In der gleichen Epoche wurde die Technik der Radierung entwickelt, bei der in das Wachs einer wachsüberzogenen Metallplatte das Druckbild mit einer Nadel eingearbeitet wird. Anschließend wird die Platte in einem Ätzbad nachbehandelt, sodass an den vom Wachs befreiten Stellen das Druckbild in die Druckform geätzt wird. Die Ätz-Radierung wurde noch bis in das 17. und 18. Jahrhundert von namenhaften Künstlern, wie beispielsweise Rembrandt verwendet. Im 17. Jahrhundert wurde die Schabtechnik entwickelt. Dabei wurde eine aufgeraute, bzw. gerasterte Druckplatte nachträglich an den nichtdruckenden Stellen geglättet. Anfang des 18. Jahrhunderts, im Jahre 1719, wurde das erste Patent zu Herstellung von Mehrfarbendruckerzeugnissen mit Hilfe der Kupfer-Schabtechnik angemeldet. Ende des 18. Jahrhunderts wurde der Tiefdruck ebenfalls für das Bedrucken von Textilgeweben verwendet. 1820 wurde der Stahlstich-Druck von dem Amerikaner Jacob Perkins entwickelt, mit dem bis heute Druckerzeugnisse, wie z.B. Banknoten, hergestellt werden. Die ersten Methoden zur Halbtoneerzeugung, also der Variation der Gravurparameter, wurden erst mit der "Heliogravur" gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt. (vgl. Ollech (1993) und Lilien (1959))

Vor allem im Laufe des 20. Jahrhunderts gewann der Mehrfarben-Tiefdruck immer mehr an Bedeutung und es haben sich Techniken durchgesetzt, die den Tiefdruck allgemein zur Massenproduktion von Druckerzeugnissen unter hoher Präzision ermöglichen. Der prominenteste Vertreter der modernen Gravurtechniken ist die elektromechanische Stichelgravur, bei der die Vertiefungen mit einem hochfrequent oszillierenden Diamantwerkzeug in die Oberfläche der Druckform geschlagen werden Kipphan (2000). In Abbildung 23 auf Seite 48 sind Mikroskopaufnahmen zweier Gravuren zu sehen, die mit dieser Technik erzeugt wurden und eine unterschiedliche Tiefe haben. Heutzutage existieren weitere Techniken, mit denen die Druckformoberfläche chemisch oder optisch bearbeitet werden. Beispielsweise kann die metallische

---

Druckformoberfläche mit einer ätzresistenten Schutzmaske beschichtet und anschließend mit einem Laserstrahl die Stellen an denen sich später Vertiefungen befinden sollen, abgetragen werden. In einem Ätzbad werden die Vertiefungen chemisch an den entsprechenden Stellen der Druckformoberfläche eingebracht. Anschließend kann die Schutzmaske entfernt werden und es bleibt die gravierte Druckform übrig. Dieser Prozess wird Laserätzgravur genannt. Ebenfalls können mit einem leistungsstarken und hierfür optimierten Laserstrahl direkt die Vertiefungen in die Druckformoberfläche eingebracht werden.

Nicht nur die Druckformherstellung ist im Tiefdruck eine Herausforderung bei der technisches Know-How und Präzision gefordert ist. Im folgenden Teilabschnitt wird erklärt welche Schritte im *Rakeltiefdruck* für einen Druckvorgang erforderlich sind.

---

### 2.1.2 Rakelprozess im Tiefdruck

---

Wie bereits beschrieben, als Tiefdruck wird eine Drucktechnologie bezeichnet, in der Vertiefungen in eine Druckform eingebracht werden, die zum Transport des Druckfluids und somit der späteren Übertragung des eigentlichen Druckbildes dienen. Im vorherigen Abschnitt wurde dem Leser ein kurzer Einstieg in die Geschichte und Funktionsweise des Tiefdrucks gewährt. Im Folgenden sollen die Grundlagen für einen Teilprozess des Tiefdrucks beschrieben werden - dem Rakelprozess. Es wurde beschrieben, dass bei der Tiefdruckformherstellung Gravuren mit bestimmtem Volumen in die Druckform eingebracht werden, die das Druckfluid transportieren. Die Vertiefungen werden mit Fluid gefüllt und das Fluid anschließend auf den Bedruckstoff übertragen. Zunächst soll gezeigt werden an welcher Stelle sich der Rakelprozess im Rakeltiefdruck wiederfindet. Bornemann hat den Tiefdruck im Rahmen seiner Dissertation (vgl. Bornemann (2014)) in fünf Teilprozesse unterteilt. Die Nummern der Teilprozesse beziehen sich auf die in Abbildung 3 aufgeführten Zahlen.

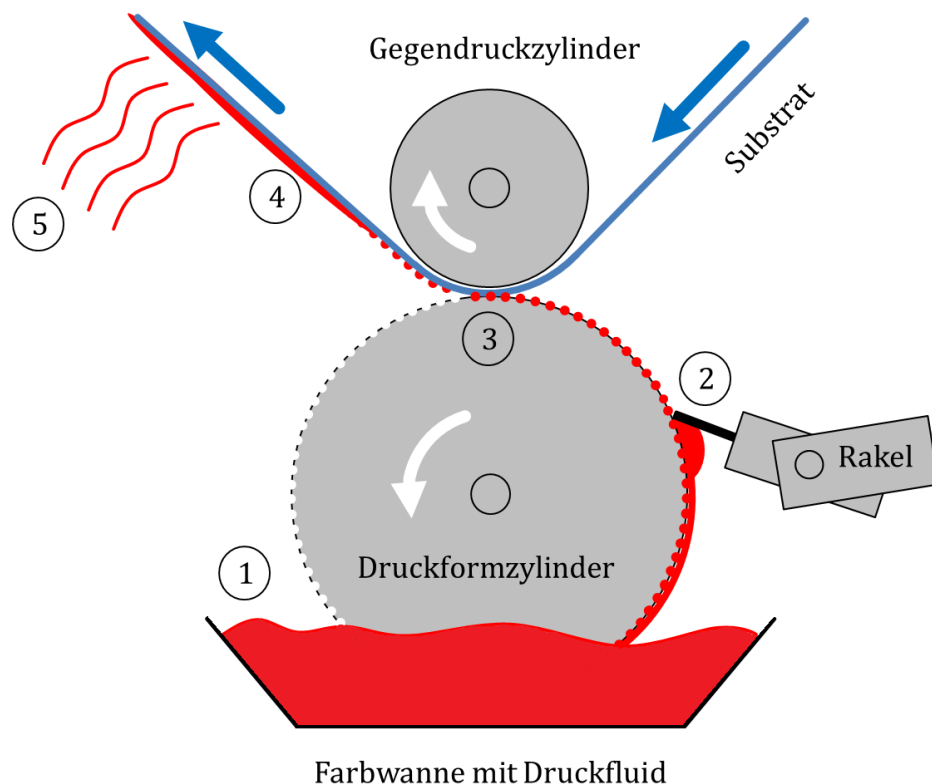
#### **Teilprozess 1: Fluidfassung und Einfärbervorgang**

Der erste Teilprozess beschreibt die Fluidfassung, auch Einfärbervorgang genannt. In Abbildung 3 ist die Fluidaufnahme mit einer Farbwanne dargestellt. Der Druckformzylinder rotiert im Fluidbad, sodass seine Oberfläche vollständig vom Fluid benetzt und geflutet wird. Dieser Teilprozess kann in modernen Druckwerken über eine Schöpf- oder Anspülwalze oder andere Dosiereinrichtungen erfolgen. Dieser Teilprozess sorgt dafür, dass die Druckform mit Druckfluid in Kontakt kommt.

#### **Teilprozess 2: Dosiervorgang**

Der Dosiervorgang beschreibt den Rakelprozess, der das zentrale Thema dieser Arbeit ist. Hier wird das überschüssige Fluid von den nicht gravierten Stellen abgestreift. Der Rakelprozess

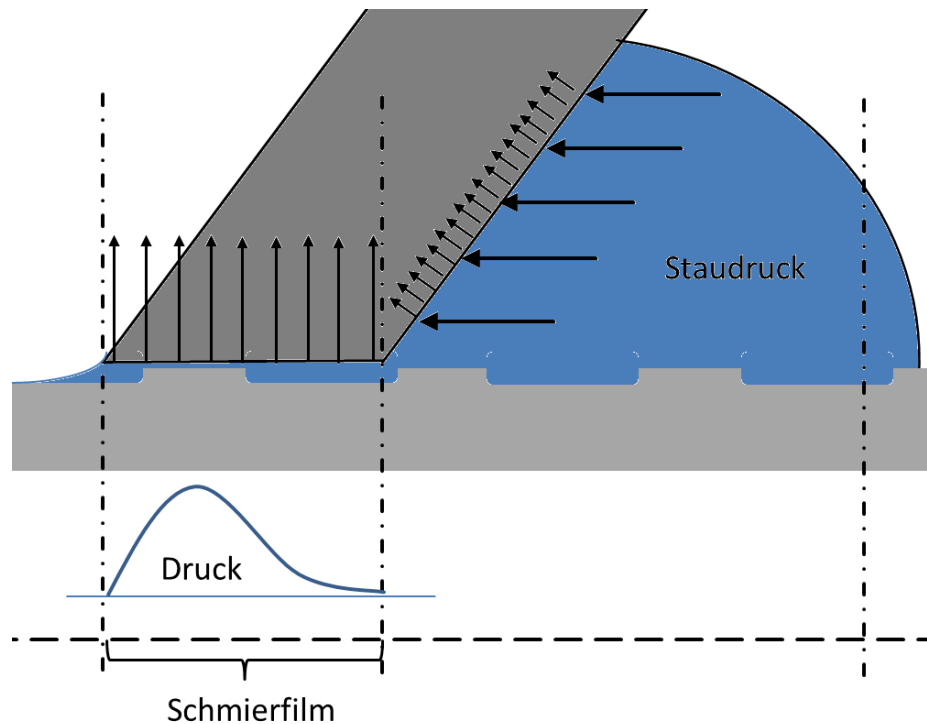
sorgt dafür, dass Fluid in der Gravur verbleibt. In Abbildung 4 ist dies schematisch dargestellt. Auf der Druckform bleibt ein dünner homogener Fluidfilm, dem *Schmierfilm* vorhanden, der Einfluss auf das spätere Druckbild hat. Der Schmierfilm vermindert den Bauteilverschleiß, soll aber auf dem späteren Druckprodukt nicht sichtbar oder vorhanden sein. Vor der Rakel staut sich das abgestreifte Fluid zu einem Fluidmeniskus auf, der einen Staudruck erzeugt. Das Fluid wird im Rakelprozess stark geschert, was bei nicht-newtonschen Fluiden zu einer Veränderung der Fließeigenschaften des Druckfluids auf der Druckformoberfläche führt. Dieser Prozess soll in der Praxis über viele Stunden das selbe Ergebnis liefern und die Druckform dabei nicht beschädigen.



**Abbildung 3:** Einteilung des Rakeltiefdrucks in 5 Teilprozesse nach Bornemann (angelehnt an Bornemann (2014))

### Teilprozess 3: Fluidübertrag

Dieser Teilprozess beschreibt den eigentlichen Druckvorgang, bei dem das Fluid von der Druckform auf den Bedruckstoff übertragen wird. Ein Gegendruckzylinder drückt das Drucksubstrat gegen den Druckformzylinder, sodass das Fluid in den gravierten Bereichen auf das Substrat übergeht. Normalerweise kommt es hier zur Fluidspaltung, bei der auch ein Teil des Fluids auf der Druckformoberfläche zurückbleibt. Das Volumen der Näpfchen, aber auch die Eigenschaften des Fluids, sowie die Materialeigenschaften der in Kontakt stehenden Oberflächen bestimmen wie viel Fluid auf das Substrat übertragen wird.



**Abbildung 4:** Skizze der Rakel, die im Fluid einen Staudruck erzeugt während sie über eine strukturierte Oberfläche rakelt; (angelehnt an Ollech (1993))

#### Teilprozess 4: Fluidformation

Die Fluidformation hängt im Wesentlichen von dem Verhalten und dem Wechselspiel von Fluid und Bedruckstoff/Substrat ab. Es kann auf Grund der entsprechenden Oberflächenenergien und Oberflächenspannungen zu Be- und Entnetzungsphänomenen kommen. Somit kann das Fluid unmittelbar nach der Fluidübertragung zu einem Film verlaufen oder ein vorhandener Film sich zu einem Tropfenmuster formen. Auch können einzelne Fluidtröpfchen auf den Bedruckstoff übertragen werden, welche durch den Pinning-Effekt, also das Gleichbleiben der Tropfengrundfläche unabhängig vom Tropfenvolumen an Ort und Stelle verbleiben. Für die Fluidformationen spielt neben den Oberflächenenergien der beteiligten Fluide auch die Oberflächenbeschaffenheit des Bedruckstoffes, wie z.B. die Rauigkeit, eine wichtige Rolle.

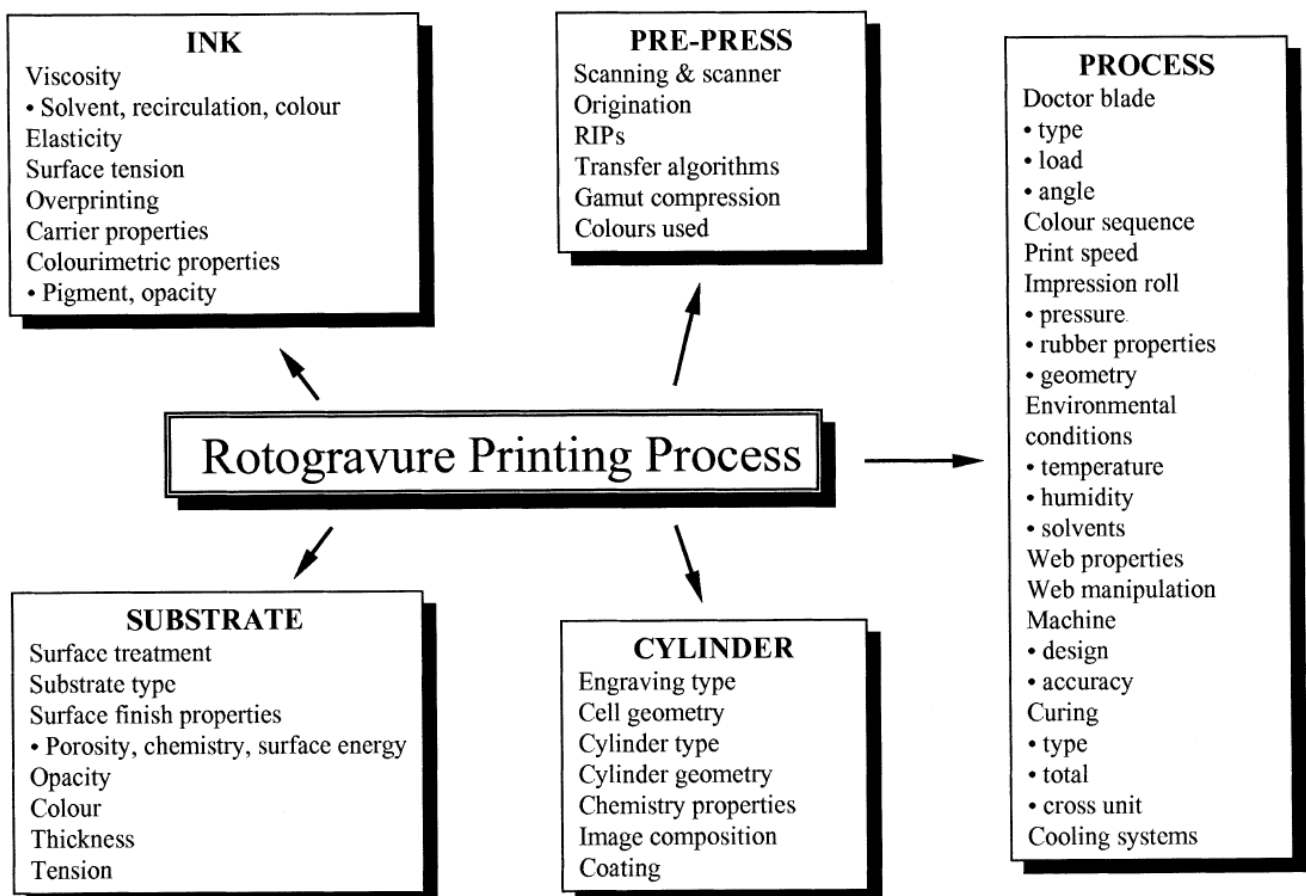
#### Teilprozess 5: Trocknung

Der Trocknungsprozess sorgt dafür, dass das Lösemittel des Druckfluids verdampft, oder das Druckfluid chemisch aushärtet. Durch die Trocknung können innerhalb des Fluids Konzentrationsgradienten entstehen. Durch die Erzeugung von Konzentrationsgradienten innerhalb des Druckfluids können hier im bereits abgedruckten Fluid neben der Fluidformation zusätzliche Dynamiken entstehen. Hier ist im Wesentlichen der Marangoni-Effekt zu nennen (vgl. Deegan u. a. (2000)). Im Falle der Aushärtung kann sich das Volumen des Druckfluids während der Härtung verändern und es können in dem sich bildenden Feststoff Spannungen, Risse und Wel-



lichkeiten entstehen.

Allgemein lässt sich sagen, dass viele Einflussfaktoren die Druckqualität des gedruckten Endproduktes beeinflussen. Eine ungefähre Übersicht über diese Einflussfaktoren sind in Abbildung 5 dargestellt. Allgemein können diese Einflussfaktoren in fünf Experimentkategorien eingegliedert werden: Die Druckvorstufe (pre-press), den Druckformzylinder (cylinder), Substrat (substrate), Druckfluid (ink) und den Prozess an sich (vgl. Bohan, Claypole, Gethin (2000)). Der Rakelprozess ist als Prozess zu betrachten. Abbildung 5 macht deutlich, dass im Tiefdruck neben der Kontrolle der Prozesse noch weitere Dinge und Arbeitsschritte berücksichtigt werden müssen. Es zeigt auch welche Komplexität hinter dem Tiefdruck steckt und dass alle Einflussfaktoren aufeinander abgestimmt werden müssen. Der Rakelprozess alleine hängt bereits von den Eigenschaften des Druckfluids, des Substrats und der Druckform ab. Wie komplex die dynamischen Vorgänge innerhalb des Tiefdrucks sind, zeigen Untersuchungen weiterer Teilprozesse des Tiefdrucks mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (vgl. Schäfer u. a. (2019) und Kumar (2015)).



**Abbildung 5:** Einflussfaktoren im Tiefdruck (entnommen aus Bohan, Claypole, Gethin (2000))

---

### 2.1.3 Rakelprozess im Tiefdruck

---

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die Rakel selbst eingegangen. Dabei werden zunächst die Begriffe zur Beschreibung einer Rakel festgelegt. Anschließend wird gezeigt welche unterschiedliche Rakelsorten es im Bereich des Tiefdrucks und in anderen technischen Bereichen gibt. Da Rakelmesser nicht nur in unterschiedlichen Formen, Größen und Schliffen existieren, sondern sich auch in der Herstellung unterscheiden, wird hierauf in Abschnitt 2.1.6 kurz eingegangen. Im Tiefdruck treten an der Rakel oft unerwünschte Effekte auf, die im Folgenden als *Störungen* bezeichnet werden. In Abschnitt 2.1.7 werden die Effekte kurz beschrieben und definiert. Anschließend wird ein eigenes mechanisches Rakelmodell zur Beschreibung der Rakel, wie sie im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wird, vorgestellt und die wirkenden Kräfte während des Rakelprozesses diskutiert.

---

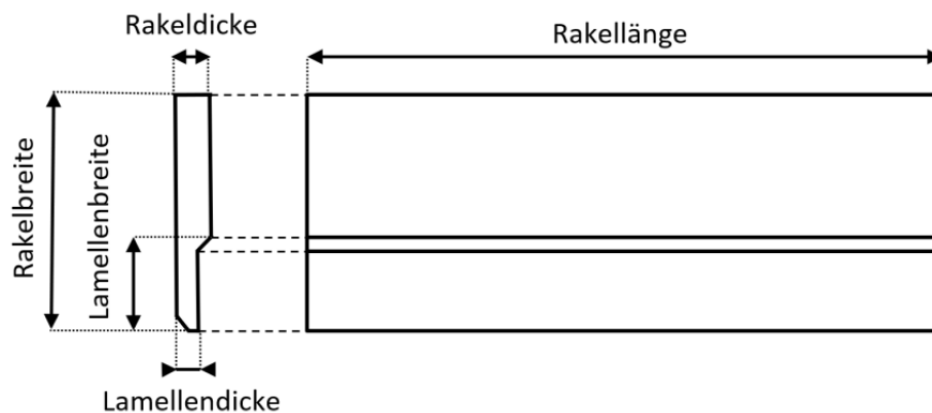
### 2.1.4 Wichtige Begrifflichkeiten aus dem Tiefdruck-Rakelprozess

---

In der Literatur finden sich viele unterschiedliche Begriffe zur Beschreibung des Rakelprozesses, die aber keine einheitliche oder konsistente Verwendung finden oder in ihrer praktischen Benutzung nicht eindeutig definiert sind. Ein Beispiel hierfür ist die Bezeichnung der *Rakel*. Unter dem Begriff Rakel werden bestimmte Werkzeuge im Bereich der Druck- und Beschichtungstechniken zusammengefasst, die oft nichts miteinander gemeinsam und vollkommen unterschiedliche Funktionen haben. Auch in der englischen Sprache existieren uneindeutige Bezeichnungen. Beispielsweise wird der Rakelprozess in manchen Quellen als *doctoring* (vgl. Hariprasad u. a. (2016)), in anderen Quellen als *doctor blading* (vgl. Miura, Yamamura (2015)) bezeichnet. Im Bereich des Rakelprozesses im Tiefdruck lassen sich unzählige solcher Beispiele finden. Zur Verständlichkeit der Arbeit sollen hier Begriffe aus der Literatur gesammelt und auch eigene Begrifflichkeiten definiert werden, um sprachliche Unklarheiten zu vermeiden.

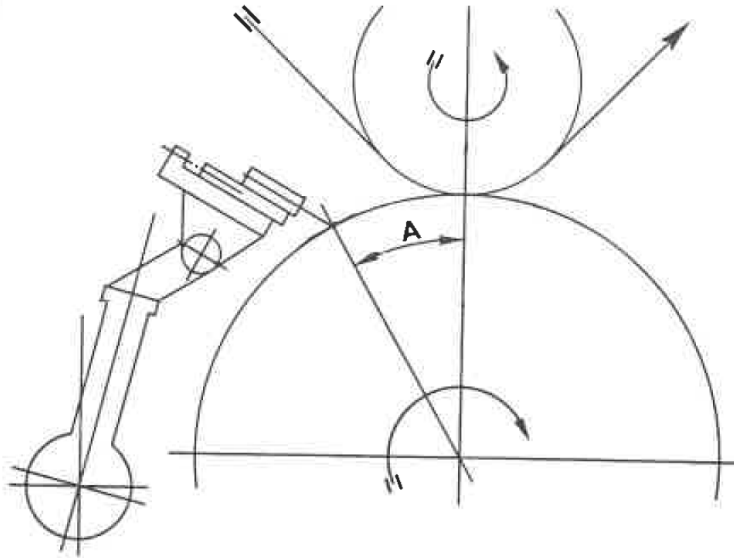
Einige Begriffe sind in Deutsche Institut für Normung e. V. (o. D.) definiert. Das *Rakelmesser* (oder *Rakelklinge*) oder die *Rakel* besteht aus einem federnden Band (Stärke < 1 mm) aus Kunststoff oder Metalllegierungen, die unter anderem Eisen, Kohlenstoff, Mangan, Chrom und Phosphor beinhalten. Rakelmesser sind in unterschiedlichen Ausführungen was Material, Form, Aufbau (z.B. Beschichtungen) und Schliff angeht kommerziell erhältlich und werden je nach Maschine und Anwendung ausgewählt. Wie zuvor beschrieben, wird beim *Rakeln* im Rakeltiefdruck überschüssiges Druckfluid vom Druckformzylinder mit einer *Rakel* abgestreift. Bei dem Abstreifen des Überschussfluids wird auch von *rakeln*, *abrakeln*, *ausrakeln* gesprochen. Was die Geometrie einer Rakel betrifft, existieren in der Praxis ebenfalls sprachliche Uneindeutigkeiten. Abbildung 6 zeigt wie *Breite* und *Länge* definiert sind. Die *Dicke* ist die *Dicke* oder auch *Stärke*

des Rakelblechs aus dem die Rakel gefertigt wurde. Die relevante Länge der Rakel entspricht üblicherweise der Breite einer Druckform.



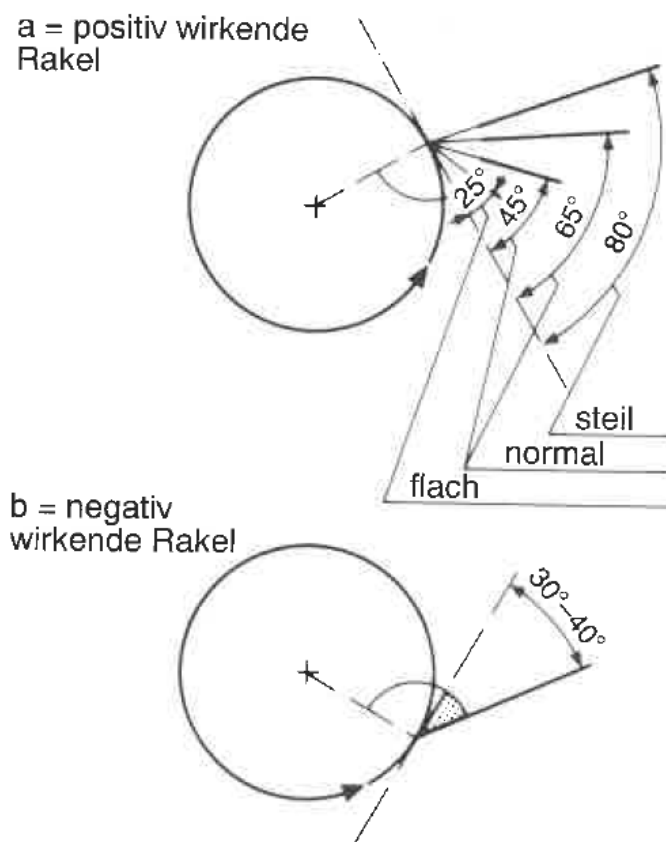
**Abbildung 6:** Skizze zur Veranschaulichung der Definition der Länge und Breite einer Rakel mit geschliffener Lamelle. (entnommen aus Melsa (2018))

Als die *Rakelfacette* (oder *Rakelfase*) wird die an der Druckform anliegende Kante bezeichnet und wird für die jeweilige Anwendung unterschiedlich geschliffen. Die von der Druckform abgewandte Seite der Rakel wird *Rakelrückseite* genannt. Den Bereich der Rakelfase, der mit der Druckform in Kontakt steht, wird *Kontaktzone* genannt und ist der Verschleißbereich einer Rakel. Zwischen Rakelfase und Druckform befindet sich der *Rakelkanal*. Als *Rakelweg* wird die Weglänge von der Position der Spitze des Rakelmessers zur Position des eigentlichen Abdrucks (*Drucklinie*) bezeichnet. In Abbildung 7 ist der Rakelweg einer Druckmaschine eingezeichnet. Vor der Rakel staut sich unter normalen Rakelbedingungen ein Fluidwulst auf, dem sogenannten *Fluidmeniskus*, der auf Grund von Reibungseffekten einen *Staudruck* auf die Rakel ausübt und das Fluid stark schert. Um das elastische Verhalten des Rakelmessers zu beeinflussen, werden oft sogenannte *Stützrakel* verwendet. Diese sind in der Regel etwas stärker als das verwendete Rakelmesser und verleihen der Rakel eine größere Biegesteifigkeit. Als *Rakeldruck*, *Linienanpresskraft*, *Rakelanpresskraft* wird die Kraft pro Länge bezeichnet, mit der die Rakel kontinuierlich an den Druckformzylinder angedrückt wird. Somit ist die Rakelanpresskraft im physikalischen Sinne keine Kraft, wird aber konventionell und auch in dieser Arbeit als solche bezeichnet. Diese Kraft soll während des Druckprozesses konstant beibehalten werden, um einen quasistatischen Zustand des Rakelprozess zu erhalten. Ein weiterer wichtiger Begriff ist der sogenannte *Rakelwinkel*. Grundsätzlich wird zwischen positiv wirkender (schleifender) Rakel und negativ wirkender (stechender) Rakel unterschieden, wobei letztere ausschließlich im flexografischen Druck eingesetzt wird und deshalb nicht weiter behandelt wird. Abbildung 8 zeigt wie der Rakelwinkel definiert werden, nämlich als Winkel, der zwischen Tangente der Druckform und der Rakel eingeschlossen wird. Da sich die Rakel je nach Einstellung durch-



**Abbildung 7:** Der Rakelweg  $A$  ist der Abstand zwischen der Position der Rakelfase und der Drucklinie; (entnommen aus Ollech (1993))

biegen kann, stellt sich an der Kontaktzone der *effektive Rakelwinkel* ein. Dieser hängt von der Rakelanpresskraft und dem eingestellten Rakelwinkel ab.



**Abbildung 8:** Der Unterschied zwischen negativ und positiv wirkender Rakel; (entnommen aus Ollech (1993))

Für die Druckform sind vor allem die Begriffe *Tonwert* und *Schöpfungsvolumen* für das weitere Verständnis wichtig. Die eingravierten Vertiefungen der Tiefdruckform werden *Näpfchen* genannt und diese beinhalten je nach Tiefe und Form des Gravurwerkzeugs ein bestimmtes Volumen an Druckfluid nach dem Abrakeln. Die Summe aller Näpfchenvolumina einer Druckform ergeben das *Schöpfungsvolumen*. Die Näpfchen werden in einem *Raster* unter dem *Rasterwinkel* eingraviert. Der *Tonwert* einer Gravur gibt den Graustufenwert des Druckproduktes zwischen 0 % und 100 % an. Ein ungravierter Bereich besitzt somit den Tonwert von 0 % und eine Gravur mit einem Tonwert von 100 % besitzt das größte Teil-Schöpfungsvolumen. Bereiche mit einem Tonwert von 100 % nennt man auch *Volltonfläche*. (vgl. Kipphan (2000))

### 2.1.5 Konventionelle Rakelsorten

Konventionelle Rakel werden aus unterschiedlichen Stählen oder Kunststoffen hergestellt und für bestimmte Anwendungen beschichtet. Außerdem sind konventionelle Tiefdruck-Rakel in unterschiedlichen Anschliffen erhältlich, die sich auf das Durchbiege- und Abrasionsverhalten der Rakel auswirken. In Tabelle 1 sind 4 Beispiele für Rakelanschliffe zusammengefasst. Die verschiedenen Anschliffe besitzen je nach Hersteller unterschiedliche Bezeichnungen, weshalb hier eine eigene Nomenklatur für die Anschliffe eingeführt wird.

**Tabelle 1:** Die wichtigsten Rakelanschliffe

	Balkenrakel
	Lamellenrakel
	Stufenrakel
	Keilschliffrakel

An dieser Stelle sei erwähnt, dass es in der Praxis keine Vorschrift oder Regel gibt, welche Rakelform in welchem Fall geeignet ist. In der Praxis hängt es stets von der Erfahrung und Vorzügen des Bedieners ab welche Rakel er wie und in welchen Fällen einsetzt.

### 2.1.6 Material und Beschichtungen der Rakel

Für den optimalen Rakelprozess muss die Rakel über die richtige Elastizität besitzen, um sich optimal an den Druckformzylinder anzuschmiegen ohne diesen zu beschädigen. (vgl. Teschner (2017)) Gleichzeitig muss das Rakelmaterial die Ausbildung einer Kontaktzone erlauben, jedoch soll eine möglichst hohe Verschleißbeständigkeit gewährleistet werden. Dies kann über das verwendete Material, aber auch mit speziellen Beschichtungen realisiert werden. Das Stahlband,

---

aus dem Stahlraket hergestellt werden, besteht in der Regel aus karbidhaltigem Kohlenstoffstahl. Der Kohlenstoffstahl besteht vorwiegend aus einer Legierung von Eisen, Kohlenstoff, Mangan, Chrom und Phosphor. Um eine Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten, wird Edelstahl mit einem Legierungszuschlag aus Chrom verwendet. Neben Kohlenstoffstählen und Edelstählen werden auch Werkzeugstähle verwendet, die Karbide aus Chrom- und Vanadiumverbindungen beinhalten. (vgl. Gray (2003) und Ollech (1993))

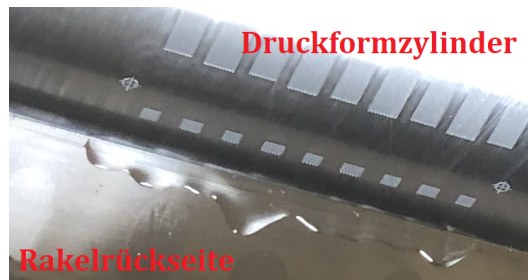
Die Eigenschaften der Rakel können auch über Beschichtungen beeinflusst werden. Hierfür werden zum Beispiel Nickel- oder Nickel-Phosphor-Legierungen verwendet. Diese sind korrosionsbeständig und beeinflussen den Reibungskoeffizienten zwischen der Rakel und dem Druckformzylinder, sowie das Abrasionsverhalten der Rakel. Um die Verschleißbeständigkeit der Rakel zu steigern, werden dem Nickel dispergierte Hartstoffe wie Metallkarbide, Metalloxide, Siliziumkarbide, Borkarbid, kubisches Bornitrid, Diamantpartikel oder Aluminiumoxid beigemischt. Da die Hartstoffpartikel den Verschleiß der Druckform beschleunigen können, wird oft eine zweite Schicht aus Nickel mit Teflon (PTFE) oder hexagonales Bornitrid aufgebracht. Die Dicke einer Beschichtung beträgt zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 40  $\mu\text{m}$ . (vgl. Gray (2003); Lunnerfjord, Sundberg, Gaven (2016))

---

### 2.1.7 Störungen des Rakelprozesses

---

Da die Wichtigkeit eines störungsfreien Rakelprozesses bereits erwähnt wurde, soll nun auch das Vokabular für typische beobachtbare Effekte an der Rakel definiert werden. Sind solche Effekte an der Rakel normalerweise unerwünscht, so werden sie im Folgenden auch als *Störungen* bezeichnet. Ein wichtiger Begriff im Zusammenhang mit Störungen des Rakelprozesses ist das *Tonen*. Tönen bezeichnet nach DIN 16528 (*Begriffe für den Tiefdruck*) das Mitdrucken von nicht druckenden Stellen der Druckform, also dem Abdrucken von Stellen außerhalb des eigentlichen Druckbilds (vgl. Deutsche Institut für Normung e. V. (o. D.)). Tönen kann entstehen, wenn durch Beschädigungen der Rakel, zu großen Staudruck oder generell nicht optimaler Rakeleinstellungen Druckfluid unter der Rakel schwallartig hindurch gedrückt wird. Somit funktioniert das Abrakeln der Druckform nicht und es entstehen Druckfehler im Druckbild. Weiter können sich durch Beschädigungen oder kleine Festkörperagglomerate an der Rakelfase *Streifen* bilden, wenn kein homogener Schmierfilm im Rakelkanal erzeugt wird. Außerdem kann sich an der Rakelrückseite beispielsweise Druckfluid oder Partikelagglomerate sammeln, antrocknen und sich von der Rakelrückseite lösen und die Druckform verunreinigen. Das Ansammeln von Fluid auf der Rakelrückseite wird in dieser Arbeit im Folgenden als *Drip-Off-Effekt* bezeichnet. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch eine Ansammlung von Fluid auf der Rückseite einer Rakel, die durch den Drip-Off-Effekt zustande kam.



**Abbildung 9:** Beispiel für den Drip-Off-Effekt an der Rückseite einer Rakel

Weiter können durch Vibrationen am Tiefdruckwerk oder der Rakelhalterung sogenannte *Ratterstreifen* entstehen. Diese entstehen, wenn die Vibrationen sich auf die Rakel übertragen und diese zu flattern beginnt. Sogenannte *Rotznasen* (auch *Auszieher*, engl. *Drag-Out-Volume*) entstehen, wenn die Rakel Fluid aus den Näpfchen auszieht und fransenförmige Auszüge in Rakelrichtung entstehen. Ollech (1993)

Ein weiterer Störungsfaktor, der beim Rakelprozess zu berücksichtigen ist, ist wie bereits erwähnt, der Verschleiß der Rakel selbst. Es lässt sich die Verschleißbeständigkeit jedoch durch Beschichtungen oder die Veränderung der Rakelparameter (z.B. Rakelanpresskraft) beeinflussen. Bei Beschichtungen von Rakelmessern werden mehrere Schichten aus zum Teil unterschiedlichen Nickel-Phosphorlegierungen auf die Rakel aufgebracht. Die Nickel-Phosphorlegierungen verlängern die mechanische Lebensdauer der Rakel. Zusätzlich können noch Hartstoffpartikel (z.B. polykristalline Diamantpartikel, Aluminiumoxid usw.) unterschiedlicher Größen in die Nickel-Phosphorlegierung eingebracht und so die Rakel beschichtet werden.

---

### 2.1.8 Rakelarten in anderen technischen Bereichen

---

Zuvor wurde bereits erwähnt, dass es neben dem Rakeltiefdruck noch weitere Tiefdruckverfahren gibt. Es existieren auch indirekte Tiefdruckverfahren, wie beispielsweise das Tampondruckverfahren. Dabei wird das Fluid zunächst von der Druckform auf ein Zwischenmedium (Tampon) übertragen, welches anschließend den Bedruckstoff bedruckt. Mit diesem Verfahren können beispielsweise gekrümmte Flächen bedruckt werden und hat mit dem Tiefdruck nur die Druckformherstellung gemein. Der Rakelprozess funktioniert in der Regel anders als beim Tiefdruck. Da beim Tampondruckverfahren mit eher niedrigen Geschwindigkeiten auf einer ebenen Druckform gerakelt wird, ist der Rakelprozess im indirekten Tiefdruckverfahren nicht mit dem hier behandelten Rakelprozess vergleichbar. Meyer (1994) Der Tampondruck wird ebenso in der gedruckten Elektronik angewendet und wurde von Bodenstein (2020) untersucht.

Auch in anderen Druckverfahren kommt eine Rakel zum Einsatz. Im Siebdruck beispielsweise muss das meist hochviskose Druckfluid auf dem Sieb gleichmäßig verteilt werden. Dies wird

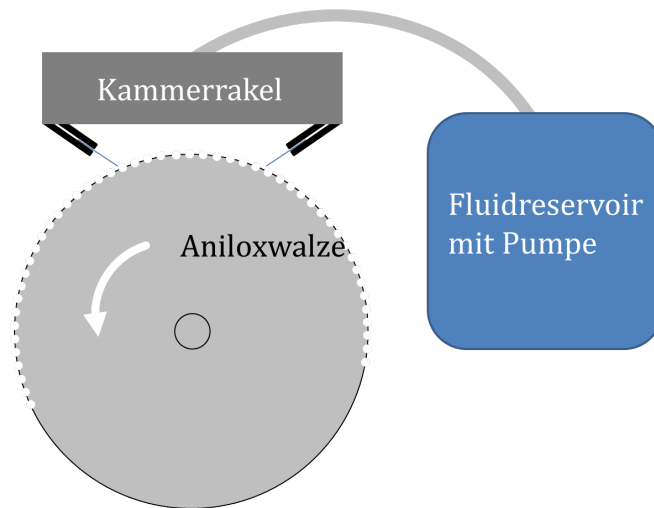


---

mit einer Flutrakel durchgeführt. Um das Druckfluid durch das Sieb auf den Bedruckstoff zu pressen, gleitet eine dicke Elastomerlippe über das Sieb und drückt das Fluid durch die Siebdruckmaschen. Einen Befüllungs- und Abstreifvorgang gibt es hier nicht, weshalb es sich um eine Art des Rakelns handelt, die hier nicht behandelt werden soll. (vgl. Scheer, H. G. (2007))

Im Flexodruckverfahren werden üblicherweise ein *Kammerrakelsystem* eingesetzt, welches in Abbildung 10 schematisch dargestellt ist. Die Kammerrakel besteht aus einer Kammer und zwei Rakeln (positiv und negativ), die mit einer Rasterwalze bündig abschließt. Aus einem Fluidreservoir kann in die Kammer Fluid gepumpt werden und zwischen den beiden Rakelklingen wird eine Rasterwalze vollflächig benetzt. Die Rasterwalze (*Aniloxwalze*) wird so abgerakelt und das Druckfluid auf die elastische Flexodruckform übertragen. Rasterwalze bedeutet, dass sich die Vertiefungen, die mit Fluid gefüllt werden, sich ohne Struktur auf der gesamten Oberfläche der Rasterwalze befinden. Das Abrakeln der Rasterwalze erfolgt über zwei Rakelkörper, die mit der Rasterwalze eine Kammer bilden, in denen das Druckfluid gefüllt wird. Die Rasterwalze besteht oft aus einem sehr harten Keramikmaterial, sodass für den Rakelprozess andere Anforderungen existieren. Auch dieser Rakelprozess soll hier nicht weiter behandelt werden.





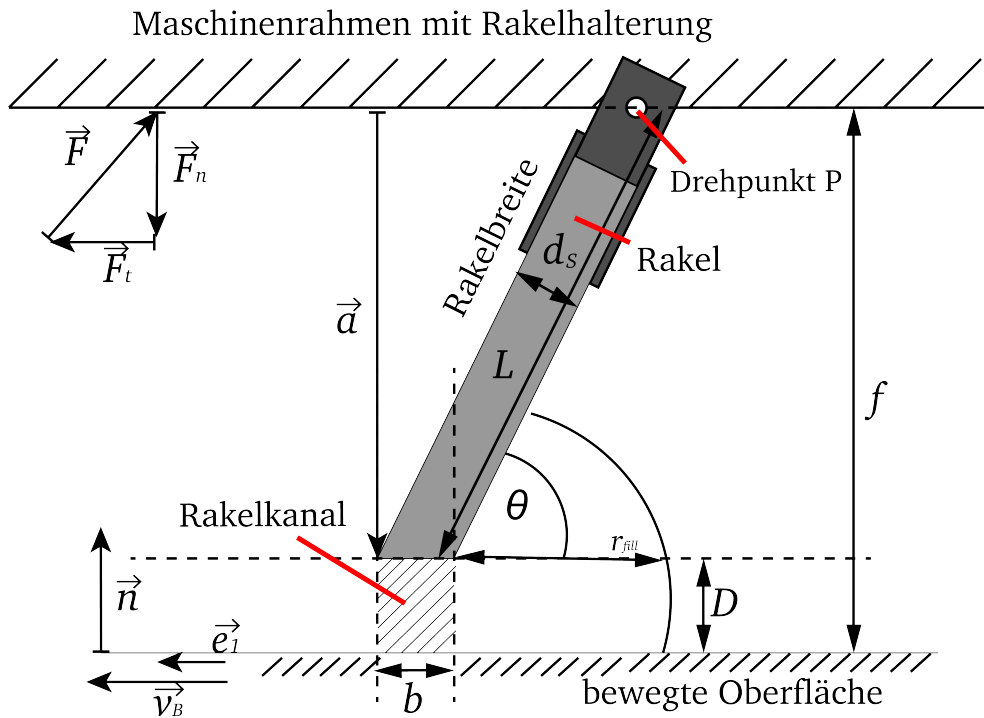
**Abbildung 10:** Schematische Darstellung eines Kammerrakelsystems

Das Scheibenwischen einer PKW-Scheibenwischeranlage könnte auch als eine Art Rakelprozess verstanden werden. Allerdings soll hier ausschließlich eine Oberfläche vom Überschussfluid befreit werden, ohne einen Befüllungseffekt zu erzielen. Hierbei handelt es sich um eine Elastomerrakel, die an einem Ende drehbar gelagert ist und über eine Glasoberfläche gleitet. In wie weit sich dieser Rakelprozess von dem hier behandelten unterscheidet oder gleicht, soll im Rahmen dieser Arbeit nicht tiefer behandelt werden.

In Herstellungsprozess von Keramikbändern wird ebenfalls vom Rakelprozess gesprochen. Hierbei handelt es sich eher um einen Schlitzgussprozess, als um ein Beschichtungs-Verfahren, das mit dem hier behandelten Rakelprozess kaum verglichen werden kann. (vgl. Kim u. a. (2006) und Chou, Ko, Yan (1987))

## 2.2 Mechanisches Rakelmodell

In Abbildung 11 ist eine Skizze des im Folgenden beschriebenen Rakelmodells dargestellt. Die Rakel wird vor allem durch ihre Vorderkante charakterisiert. Die räumliche Orientierung der Rakelkante ist durch einen Vektor  $\vec{a}$  auf einer glatten, geraden Oberfläche bestimmt. Die Rakelgeschwindigkeit  $\vec{v}_B = v_B \vec{e}_1$  ist orthogonal zu  $\vec{a}$ .  $\vec{e}_1$  ist der zu  $\vec{v}_B$  zugehörige Einheitsvektor und  $v_B = |\vec{v}_B|$  ist der Betrag der Relativgeschwindigkeit.  $L$  ist die *Rakelbreite*. Die Rakel gleitet auf der festen Oberfläche. Die für diese Bewegung verantwortliche Kraft ist  $\vec{F} = \vec{F}_t + \vec{F}_n$ . Die Vektorkomponente  $\vec{F}_t$  ist der Tangentialanteil, wobei  $\vec{F}_n$  die wirkende Normalkomponente der Kraft  $\vec{F}$  ist und *Rakelanpresskraft* genannt wird. Die Normalkomponente  $\vec{F}_n$  drückt die Rakel auf die sich bewegende Oberfläche, die Kraftkomponente  $\vec{F}_t$  wirkt der Reibung zwischen Rakel und Oberfläche entgegen.



**Abbildung 11:** Skizze eines Rakelmodells

$d_s$  = Rakeldicke;  $L$  = Rakelbreite;  $\theta$  = Rakelwinkel;  $b$  = Kontaktzonenlänge;  $D$  = Rakelkanalhöhe;  $f$  = Abstand Drehpunkt;  $\vec{v}_B$  = Rakelgeschwindigkeit;  $\vec{n}$  = Normalenvektor der bewegten Oberfläche;  $r_{fill}$  = Füllhöhe Fluidmeniskus

Unter der Berücksichtigung der Reibung existieren im Wesentlichen drei Regime. Die Rakel kann in direktem mechanischem Kontakt mit der sich bewegenden Oberfläche stehen oder alternativ durch einen, von dem Fluid erzeugten Schmierfilm von einander getrennt sein. Im Falle der Schmierung, ist der direkte mechanische Kontakt ausgeschlossen. Im dritten Fall, besteht über-

hauptsächlich kein Kontakt zwischen sich bewegender Oberfläche, bzw. Fluid und der Rakel. Dieser Fall ist trivial und wird deshalb nicht weiter behandelt. Der Schmierfilm, sofern er vorhanden ist, soll die Dicke  $D > 0$  besitzen.  $D$  ist ein dynamischer Parameter, der von  $\vec{F}$ ,  $v_B$  und dem Fluid, genauer von den rheologischen Eigenschaften des Fluids, abhängt.

An dieser Stelle sei bemerkt, dass unter dem Begriff *Rakeln* auch weitere Konfigurationen zusammengefasst werden. Es existiert die beschriebene Anordnung auch mit einem fest vorgegebenen Spalt  $D_0$ . Dieser Fall soll nicht betrachtet werden.

Mit Hilfe von Abbildung 11 werden die an der Rakel wirkenden Kräfteverhältnisse im Rakelprozess beschrieben. Die Rakel, bestehend aus einem geschliffenen Stahlband der *Rakeldicke*  $d_s$  und *Rakelbreite*  $L$  ist in einer Halterung, der sogenannten Rakelhalterung, fest eingespannt. Die Rakelhalterung drehbar an Drehpunkt P gelagert. Die Lagerung ist in einem festen Abstand  $f$  von der sich bewegenden Oberfläche angebracht. Es wird angenommen, dass  $L > f$ , sodass die Rakel selbst unter einem Winkel  $\theta \leq \Theta$  gegenüber der Oberfläche geneigt sein muss.  $\Theta$  ist der *Maximalwinkel*, der größtmögliche Winkel, den die Rakel auf Grund der geometrischen Anordnung annehmen kann. Daraus folgt direkt, dass für  $\Theta$  folgender Zusammenhang gelten muss:

$$\sin \Theta = \frac{f}{L} < 1 \quad (1)$$

Im Falle von  $\theta = \Theta$  berührt die äußere Rakelkante die sich mit  $v_B$  bewegende Oberfläche und ist mit dieser in direktem mechanischen Kontakt. Die Rakel hebt sich von der Oberfläche, sobald sich  $\theta$  zuspitzt und ein Schmierfilm in der Größe von  $D$  entsteht zwischen Rakelkante und Oberfläche. Aus Abbildung 11 ist ersichtlich, dass aus Gleichung 1 für den Rakelkanal  $D$  gilt:

$$D = f - L \sin \theta \begin{cases} \theta \rightarrow 0 : & D = f \\ \theta \rightarrow \Theta : & D = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Weiter wird angenommen, dass  $\Theta - \theta \ll \Theta$ , außerdem  $D \ll L$ . Mit diesen Annahmen kann ein Ausdruck für die Größe des Rakelkanals  $D$  hergeleitet werden. Aus Gleichung 1 und Gleichung 2 folgt  $D = L (\sin \Theta - \sin \theta)$ . Mit einer Taylorentwicklung von  $\sin \Theta$  um  $\theta \rightarrow \Theta$  folgt

$$\sin \Theta = \sin \theta + \cos \theta (\Theta - \theta) + O(\Theta^2) \quad (3)$$

$$\rightarrow D \approx L (\Theta - \theta) \cos \theta \quad (4)$$

---

## Kräftebetrachtung an der Rakel

---

Im Folgenden Abschnitte soll die Dynamik einer Rakel mathematisch beschrieben werden. Um zu verstehen, welche Parameter einen Einfluss auf die an der Rakel wirkenden Kräfte haben, wird eine Kräftebetrachtung durchgeführt. Die Beschreibungen beziehen sich auf Abbildung 11. Das Abheben der Rakel kommt durch eine Durchbiegung der Rakel zustande. Da es sich bei der Rakel um einen elastischen Festkörper mit Elastizitätsmodul  $E_0$  handelt, wird dies in Abbildung 11 durch die drehbare Lagerung der Rakel um den Drehpunkt P dargestellt. Auf die Rakel wird durch die tangentielle Kraftkomponente  $\vec{F}_t$  (verursacht durch Reibung) ein konstantes Drehmoment  $\vec{M}$  ausgeübt und somit auch eine Kraft  $|\vec{F}_t| = \frac{|\vec{M}|}{L}$  auf die Rakel. Nur die Normalenkomponente dieser Kraft, hier  $\vec{F}_n$ , wirkt auf die bewegte Oberfläche. Weiter wird angenommen, dass parallel zur Oberflächennormalen  $\vec{n}$  keine Bewegung der Oberfläche stattfinden und die Rakel keine Tangentialkräfte auf die Oberfläche ausüben kann. Da die Rakel gegenüber der Oberfläche unter dem *Rakelwinkel*  $\theta$  geneigt ist, muss in die Betrachtung des Kräftegleichgewichts eine kompensierende Kraft  $\vec{F}$  miteinbezogen werden. Diese Kraft setzt sich aus zunächst allen sonstigen Kräften, außer der von dem Fluid verursachten Kräften, zusammen. Existiert kein Fluid auf der sich bewegenden Oberfläche und unter der Rakel, so gilt für die Kräftebetrachtung

$$\vec{F}_t + \vec{F}_n + \vec{F} = 0 \quad (5)$$

wobei  $\vec{F}_t$  orthogonal zu  $\vec{F}$  und unter dem Winkel  $\theta$  gegenüber der Kraft  $\vec{F}_n$  geneigt ist. Da  $\vec{F}_n$  auf Grund der Maschinenarchitektur konstant gehalten wird, kann abgeleitet werden, dass  $|\vec{F}_t| = \frac{|\vec{F}|}{\cos \theta}$  und  $|\vec{F}| = |\vec{F}_n| \tan \theta$ . Hieraus folgt, dass im Falle von  $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$ , also wenn die Rakel fast orthogonal zur sich bewegenden Oberfläche steht, kann bei konstanter Durchbiegekraft der Rakel  $\vec{F}_t = \text{const}$  die Normalkraft  $\vec{F}_n \rightarrow \infty$  werden.

Im Folgenden wird die Auswirkung eines Fluids auf die Kräfteverhältnisse untersucht. Es wird angenommen, dass sich im Spalt zwischen sich bewegender Oberfläche und der Rakel ein Fluidvolumen mit Viskosität  $\eta$  befindet, das sich vor der Rakel zu einer Füllhöhe  $r_{fill}$  aufstauen kann. Dieses Fluidvolumen wird *Fluidmeniskus* genannt. In der Realität könnte dies durch die Gravitation, Kapillarkräfte und die Viskosität des Fluids zustande kommen. Es wird angenommen, dass die Füllhöhe  $r_{fill}$  zeitlich nahezu konstant bleibt, da der Volumenstrom im Kanal auf den betrachteten Zeitskalen vernachlässigbar klein ist. Dies ist im realen Tiefdruckprozess der Fall. Außerdem wird in industriellen Rakelprozessen, meist über eine Dosier- und Pumpvorrichtung, der Rakel kontinuierlich Fluid hinzugefügt. Weiter sei angenommen, dass die Rakel eine endliche Dicke  $d_s$  besitzt eine solche Form hat, dass ihre Kante mit der bewegten Oberfläche einen Rakelkanal der Länge  $b = \frac{d_s}{\sin \theta}$  bildet. Dieser Bereich der Rakel wird *Kontaktzone* genannt.

Im Falle der Ausbildung eines Gleitfilms zwischen Rakel und bewegter Oberfläche bekommt  $\vec{F}_n$

einen zusätzlichen Beitrag  $\vec{F}_{visc}$  in Richtung von  $\vec{e}_1$ , sodass  $\vec{F}_n$  nicht mehr senkrecht zur Oberfläche steht.  $W$  ist die Länge der Rakel, welche in Abbildung 11 nicht eingezeichnet ist und im Tiefdruckprozess der Breite des Tiefdruckzylinders entspricht.  $A$  ist somit die Gesamtfläche der Kontaktzone. Aus Gleichung 13 gilt mit der Beziehung  $A = W \cdot b$  und  $\frac{\partial v}{\partial z} \triangleq \frac{v_B}{D}$ :

$$\vec{F}_{visc} = -\eta W b \frac{v_B}{D} \vec{e}_1 \quad (6)$$

$\vec{F}_{visc}$  wirkt als zusätzliche Verstärkung der Kraft  $\vec{F}$ . Beide Kräfte spannen außerdem den Rakelwinkel  $\theta$  auf, sodass für die Kraft, welche die Rakel auf Grund des Staudrucks von der bewegten Oberfläche weg drückt, gilt:

$$\vec{F} = |\vec{F}_{visc}| \tan \theta \vec{n} = \frac{\eta b W v_B}{D} \tan \theta \vec{n} \quad (7)$$

Dass sich die Rakel von der Oberfläche entfernen kann, muss gelten dass  $|\vec{F}| \geq |\vec{F}_n|$ , so dass gilt:

$$\frac{\eta b W v_B}{D} \tan \theta \geq |\vec{F}_t| \quad (8)$$

$|\vec{F}_t|$  wächst an bei größer werdendem Rakelkanal, gleichzeitig sinkt die vom Staudruck bewirkte Kraft  $|\vec{F}_{visc}|$ . Somit stellt sich ein Kräftegleichgewicht ein, das zu einem zeitlich konstanten Rakelkanal führt.

$$D = \frac{\eta b W v_B}{|\vec{F}|} \tan \theta \quad (9)$$

Für den Ausdruck  $\tilde{F} = \frac{|\vec{F}_n|}{w}$  wird an dieser Stelle ein neuer Begriff eingeführt, die sogenannte *Rakelanpresskraft*. Mit der Einheit  $N/m$  ist die Rakelanpresskraft streng genommen keine Kraft, jedoch ist diese Größe ein gängiger Maschinenparameter in Tiefdruckmaschinen. Diesen Parameter so zu definieren macht Sinn, da die Rakelanpresskraft unabhängig von der tatsächlichen Länge der Rakel sein soll und somit die Reproduzierbarkeit des Rakelprozesses für alle Druckformbreiten sicherstellen soll.

Der Rakelkanal  $D$  wird zu einem dynamischen Parameter, sobald Fluid in das Modell integriert wird. Fluiddynamische Kräfte, wie Kapillarkräfte wurden in diesem Modell nicht berücksichtigt.

---

## 2.3 Strömungen von Flüssigkeiten und ihre Beschreibung

---

Der folgende Abschnitt soll die wichtigsten Grundbegriffe und physikalischen Größen zur Beschreibung von Flüssigkeiten und ihrem Verhalten unter bestimmten Bedingungen zusammenfassen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Außerdem werden verschiedene Arten von Strömungen und dimensionslose Größen in Abschnitt 2.3.2 beschrieben.

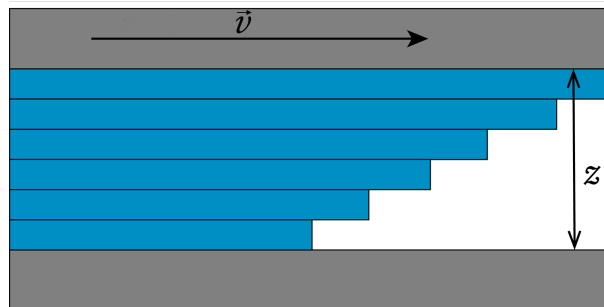
---

### 2.3.1 Viskosität, Schubspannung und innere Reibung

---

Befindet sich eine Flüssigkeit in zwei sich zueinander gegenseitig bewegten Platten, so wirkt eine der Kraft der Bewegung entgegen, ausgelöst durch die *innere Reibung* der Flüssigkeit. Beide Platten haben einen Abstand  $z$  und eine Fläche  $A$  (vgl. Abbildung 12). Die Platten bewegen sich mit einer Relativgeschwindigkeit  $\vec{v}$ . Die innere Reibung hängt noch von einer intrinsischen flüssigkeitsabhängigen Größe, der *dynamische Viskosität*  $\eta$ , ab. Es wird hier ausdrücklich von der Scherviskosität gesprochen. Die Viskosität wird häufig durch die Dichte  $\rho$  ausgedrückt. In diesem Fall wird von der *kinematischen Viskosität*  $\eta_{kin}$  gesprochen.

$$\eta_{kin} = \frac{\eta}{\rho} \quad (10)$$



**Abbildung 12:** Skizze einer Flüssigkeit (blau) zwischen zwei sich relativ zueinander bewegenden Platten (grau)

Experimentell lässt sich zeigen, dass die Kraft, die der Bewegung entgegen wirkt, folgende Zusammenhänge besitzt:

$$F \propto \frac{1}{z}; \quad F \propto A; \quad F \propto \frac{1}{v} \quad (11)$$

---

Somit lässt sich im o.g. Fall die wirkende Kraft beschreiben als:

$$F = \text{const.} \cdot \frac{Av}{z} \quad (12)$$

Die Konstante  $\text{const.}$  ist die Viskosität  $\eta$ . Allgemeiner wird die entgegenwirkende Kraft  $F$ , die *Scherkraft*, in differentieller und vektorieller Form beschrieben als:

$$\vec{F} = \eta A \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \quad (13)$$

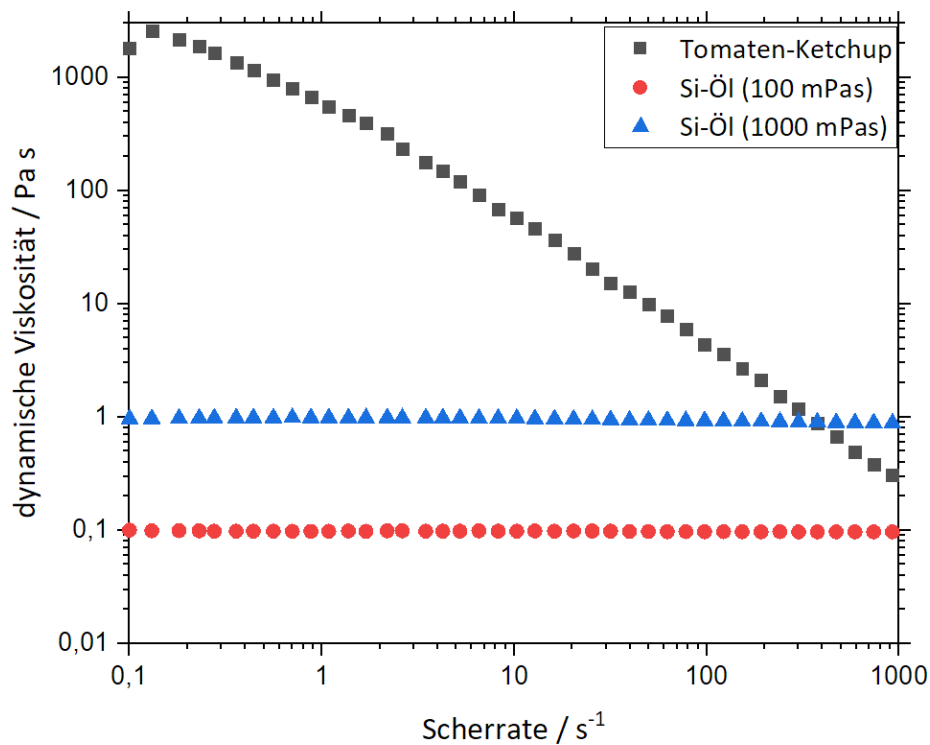
Die Geschwindigkeitsverteilung zwischen den Platten ist also ortsabhängig. Bei dem Geschwindigkeitsgradient

$$\dot{\gamma} = \partial \vec{v} / \partial z \quad (14)$$

wird von der *Schergeschwindigkeit* oder der *Scherrate* gesprochen. Die dynamische Viskosität  $\eta$  ist eine von der Temperatur  $T$  abhängige Größe:

$$\eta = \eta \propto e^{(b/T)} \quad (15)$$

Ändert sich die Viskosität einer Flüssigkeit unter Wirkung einer Schubspannung, so wird sie *nicht-newtonsche Flüssigkeit* genannt. Die Scherung kann zu einer Erniedrigung und zu einer Erhöhung der dynamischen Viskosität führen. Abbildung 13 zeigt exemplarisch die unterschiedlichen Verhaltensweisen von nicht-newtonschen und newtonschen Fluiden. Silikonöle sind in unterschiedlichen Viskositäten kommerziell erhältlich und ihre dynamische Viskosität ist unabhängig von der Scherrate. Ketchup ist ein klassisches Beispiel für ein nicht-newtonsches Fluid, da mit angelegter Scherspannung die Viskosität stark abnimmt.



**Abbildung 13:** Vergleich von newtonschem und nicht-newtonschem Verhalten. Silikonöle (blau und rot) sind newtonsche Fluide, wohingegen Ketchup (schwarz) ein nicht-newtonsches Verhalten zeigt

Strömungen, deren Verhalten im Wesentlichen auf der inneren Reibung beruhen, werden *laminaire Strömungen* genannt. Für ein zwischen zwei Platten strömendes Volumenelement  $dV = dx dy dz$  gilt für die innere Reibung  $dF_r$ :

$$d\vec{F}_r = d\vec{F}_{oben} + d\vec{F}_{unten}$$

$$d\vec{F}_r = \eta \left( \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2} \right) dV \quad (16)$$

### 2.3.2 Verschiedene Typen von Strömungen und dimensionslose Größen

Es gibt unterschiedliche Regime in denen Strömungen voneinander unterschieden werden können. Bei entsprechenden Strömungs- und Fluidbedingungen kann eine Strömung ohne Verwirbelungen, mit stationären Verwirbelungen bis hin zu Verwirbelungen mit chaotischem Verhalten auftreten. Man unterscheidet folgende Regime:



- ideale Flüssigkeitsströmungen: innere Reibung kann vernachlässigt werden.
- laminare Strömungen: Die inneren Reibungskräfte führen zur Beschleunigung des Volumenelements  $dV$ .
- turbulente Strömungen: Bei extremen Geschwindigkeitsänderungen von  $dV$  im Strömungsfeld, wird die laminare Strömung instabil

Ein Teilchen, dass sich in stationärer Strömung befindet und sich in Zeit  $t$  entlang der Strecke  $l$  bewegt, erfährt im zeitlichen Mittel Beschleunigungen  $a_2 \approx v^2/l$ .  $l$  wird auch als charakteristische Länge bezeichnet und beschreibt die Größenordnung der Längenskala. Analog kann  $t$  auch als charakteristische Zeit bezeichnet werden. Somit kann die Navier-Stokes-Gleichung umgeschrieben werden als Ausdruck von Trägheits-, Druck-, und Reibungskraftdichte.

$$\frac{\rho v^2}{l} \approx \frac{p}{l_2} + \frac{\eta v}{l_3^2} \quad (17)$$

Wobei  $l$ ,  $l_2$  und  $l_3$  voneinander unabhängig sind. Es gilt die hydrodynamische Ähnlichkeitstheorie, die besagt, dass die Betrachtung eines größeren bzw. kleineren Modells der Strömung unabhängig von bestimmten dimensionslosen Größen ist. Das gilt beispielsweise für die *Reynoldszahl*  $Re$ .

$$Re = \rho v l / \eta \quad (18)$$

Für kleine Werte von  $Re < 1$  ist die Strömung laminar. Für Werte  $Re > 1$  wird die Strömung turbulent.

Eine weitere dimensionslose Kennzahl ist die *Kapillarzahl*  $Ca$ . Sie ist definiert als

$$Ca = \frac{\eta v}{\sigma} \quad (19)$$

wobei  $\sigma$  die *Oberflächenspannung* des Fluids beschreibt. Die Oberflächenspannung ist ein Maß für die Arbeit, die es benötigt um die Grenzfläche zwischen flüssiger Phase und Gasphase aufzutrennen. Das Produkt aus Kapillarzahl und Reynoldszahl ergibt ist eine weitere dimensionslose Kennzahl, die *Weberzahl*  $We$ .

$$\begin{aligned} We &= Ca \cdot Re \\ &= \frac{\rho v^2 l}{\sigma} \end{aligned} \quad (20)$$

---

Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle noch die Bond-Zahl  $Bo$  genannt.

$$Bo = \frac{\rho g l^2}{\sigma} \quad (21)$$

$l$  ist die charakteristische Länge.

Bei der genaueren Betrachtung der drei dimensionslosen Größen fällt auf, dass Weberzahl und Bondzahl die Dichte des Fluids berücksichtigen, wobei die Kapillarzahl weder Dichte  $\rho$  noch die Erdbeschleunigung  $g$  berücksichtigt. Da davon auszugehen ist, dass bei der Beobachtung des Rakelprozesses auf Grund seiner hohen Geschwindigkeiten und Scherraten die Schwerkraft vernachlässigt werden kann und auf Grund der kleinen charakteristischen Längen ( $l \approx 10^{-9} - 10^{-6}$ ) Weberzahl und Bondzahl sehr klein sind, kommt die Kapillarzahl für die Beschreibung des Rakelprozesses am ehesten in Frage. Für den Rakelprozess ist die charakteristische Länge durch den Rakelkanal definiert, dieser kommt dem Innendurchmesser einer Rohrströmung am nächsten. Die Kapillarzahl variiert im Rakelprozess je nach Druckgeschwindigkeit und Fluidviskosität im Bereich von  $Ca = 0,001 - 10$ . (vgl. Kitsomboonloha u. a. (2012))

---

## 2.4 Stand der Forschung

---

Dieses Unterkapitel soll eine Übersicht über bisherige wissenschaftliche Publikationen zum Rakelprozess im Tiefdruck bieten. Der Rakelprozess wurde in der Vergangenheit auf unterschiedlichste Weise untersucht. Da es sich bei dem Rakelprozess im Allgemeinen um einen komplexen Prozess mit vielen Einflussfaktoren handelt, sind die Wissenschaftler jeweils unterschiedlich vorgegangen und haben entsprechend ihren Fokus auf unterschiedliche Einflussgrößen oder Rakelparameter gelegt. Abbildung 5 zeigt eine Übersicht über die möglichen Parameter, die einen Einfluss auf die Druckqualität im Tiefdruck haben. Der Rakelprozess an sich besitzt ebenfalls eine eigene Auswahl an Einflussfaktoren, welche sich auch auf die Druckqualität des Endprodukts auswirken. In Tabelle 2.4 sind die wichtigsten Untersuchungsschwerpunkte der Arbeiten über den Rakelprozess als Übersicht zusammengefasst. Tabelle 2.4 unterscheidet zunächst zwischen experimentellen (E) oder theoretischen (T) Arbeiten. Außerdem untersuchen die meisten wissenschaftlichen Arbeiten den Einfluss des Rakelwinkels ( $\theta$ ), der Fluidviskosität ( $\eta$ ), der Rakelanpresskraft ( $F_A$ ) und der Rakel-/Druckgeschwindigkeit ( $v$ ). Die letzte Spalte von Tabelle 2.4 unterscheidet, ob die Untersuchungen den Rakelprozess selbst und in Echtzeit durchgeführt wurde (R) oder lediglich das Ergebnis des Rakelprozesses oder das Druckergebnis betrachten. Um Tabelle 2.4 verständlicher zu machen, werden die Publikationen anschließend jeweils kurz inhaltlich zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Übersicht über den Fokus von Publikationen zum Rakelprozess

E: experimentell; T: theoretisch

$\theta$ : Rakelwinkel;  $\eta$ : Viskosität;  $F_A$ : Rakelanpresskraft;  $v$ : Geschwindigkeit;

R: in Echtzeit untersucht

Autor (Jahr)	T	E	$\theta$	$\eta$	$F_A$	$v$	R
Moffatt (1963)							
Scheuter, Bognar (1968)							
Strauß (1975)							
Hanumanthu (1999)							
Bohan, Claypole, Gethin (2000)							
Kitsomboonloha u. a. (2012)							
Lu, Zhang, Li (2013)							
Kitsomboonloha, Subramanian (2014)							
Miura, Yamamura (2015)							
Hariprasad u. a. (2016)							
Hoang, Ko (2015)							
Jeon, Kim, Kim (2017)							
Hu, Subramanian, Liu (2018)							
Tjiptowidjojo, Hariprasad, Schunk (2018)							

---

### **Moffatt (1963)**

Moffatt beschreibt in dieser Arbeit auf mathematische Weise die Strömungen und Verwirbelungen in zweidimensionalen geometrischen Anordnungen, die unter dem Begriff *sharp corners* zusammengefasst werden. Einer der Fälle, die Moffat betrachtet, kommt der Geometrie wie sie im Rakelprozess im Tiefdruck vorkommt sehr nahe. Moffat zeigt in diesem Abschnitt, wie das Geschwindigkeitsprofil in einem Fluidmeniskus unter der Rakel aussieht und zeigt, dass unter diesen Randbedingungen keine Verwirbelungen vorkommen. Moffat betrachtet in dieser Arbeit auch noch weitere Spezialfälle, in denen Störungen auftreten, die für Verwirbelungen im Strömungsfeld wirken und je nach Randbedingung eine ganze Folge von Verwirbelungen erzeugen. Er beschreibt das Vorkommen einer ganzen Sequenz von Wirbeln unter bestimmten Randbedingungen, wobei die innere Reibung im strömenden Fluid als Hauptursache für das Auftreten von Verwirbelungen identifiziert wird.

### **Scheuter, Bognar (1968)**

In der Studie *Beitrag zum Rakelproblem* von 1968 wurden Untersuchungen über die wirkenden Kräfteverhältnisse an der Rakel an realen Druckformzylindern durchgeführt. Die Autoren haben mit einem experimentellen Setup, bestehend aus vier piezoelektrischen Quarzgebern, Verstärker und Anzeigeelektronik die "Farbkraft" (gemeint ist vermutlich die Scherkraft) unter der Rakel bestimmt. Dazu wurden an vier Bohrungen in einer ca. 1 m breiten (gemeint ist 1 Meter langen) Rakel Gumischläuche angebracht, die mit den Quarzgebern verbunden waren. Die Quarzgeber gaben ein Spannungssignal an die Verstärkerelektronik weiter. Neben den an der Rakel wirkenden hydraulischen Kräften wurde eine Abschätzung über die mechanischen Kräfte während des Rakelprozesses durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass sich der Druckformzylinder auf Grund des Anpresskraft des Gegendruckzylinders sinusförmig durchbiegt und sich die Rakel formschlüssig an den Druckformzylinder anpasst. Die Autoren kamen auf Grund ihrer Untersuchungen zum Schluss, dass der optimale Rakelwinkel (d.h. Minimierung des Materialverschleißes und Minimierung der Rakelanpresskraft) bei  $\theta = 80^\circ$  liegt.

### **Strauß (1975)**

Strauß untersucht in dieser Arbeit auf theoretischer Ebene das Strömungsprofil, dass sich an einer Rakel bei newtonschen und nicht-newtonschen (Maxwell-Oldroyd-Flüssigkeit) ausbildet. Eine Maxwell-Oldroyd-Flüssigkeit verhält sich in einer Couette-Strömung wie eine newtonsche Flüssigkeit, jedoch besitzt noch elastische Anteile, was sich in einer Zugspannung in Strömungsrichtung äußert. Der Autor löst für die im Rakelprozess gegebenen Randbedingungen ein Differentialgleichungssystem, dass die Maxwell-Oldroyd-Flüssigkeit beschreibt und findet, dass sich in der Nähe des Rakelkanals Sekundärströmungen ausbilden, die es bei newtonschen Fluiden so nicht gibt. Das nicht-newtonsche Verhalten beeinflusst maßgeblich das Stromlinienfeld in der Nähe des Rakelkanals. Die Normalkraftverteilung, die auf die Rakel wirkt ist in der Nähe des

---

Rakelkanals zwar unterschiedlich, jedoch verhalten sich beide Flüssigkeitssysteme hinreichend entfernt vom Rakelkanal nahezu gleich.

### **Hanumanthu (1999)**

Die Studie von Hanumanthu aus dem Jahre 1999 ist eine experimentelle Arbeit, die sich mit der Beschichtung mittels Rakel auseinandersetzt. Die Arbeit wird hier jedoch dennoch aufgeführt, da der Prozess bis auf wenige Ausnahmen sehr ähnlich zum Tiefdruck ist. In der Studie wurde untersucht, dass bei der Rakelbeschichtung die Schichtdicke auf den ersten tausenden Metern um 8 % abnahm und die Schicht gleichmäßiger wurde, was der Autor bei früheren Untersuchungen beobachtete. Der Autor führt dies auf einen Einschleifprozess der Rakel zurück, die zu Beginn des Rakelprozesses die Form der Rakelfase verändert. Für die Experimente wurde ein vollflächig gravuierter Druckformzylinder verwendet, dessen Gravuren ähnlich der Gravur mit einem Tonwert von 100 % (Durchstich) entspricht. In Abbildung 23 (rechts) auf Seite 48 ist ein solches Gravurnäpfchen zu sehen. Der Beschichtungsprozess wurde mit einer Kapillarzahl von  $Ca = 1,2$  durchgeführt, was ebenfalls dem Rakelprozess im Tiefdruck ähnlich ist. Unterschiede zum Tiefdruck bestand darin, dass der Gegendruckzylinder mit einem Mantel aus Gummi versehen war und zwischen Rakel und Druckformzylinder ein fester Spalt eingestellt wurde. Mit Hilfe der *lubrication approximation* wurde ein 4-Parameter-Modell aufgestellt, dass die Schichtdicke für verschiedene Geometrien von Rakelfasen vorhersagt.

### **Bohan, Claypole, Gethin (2000)**

Die Studie von Bohan, Claypole und Gethin bestand aus einer experimentellen Untersuchung von Einflussfaktoren auf das Druckergebnis einer Tiefdruckmaschine mit mehreren Farbwerken. Hierbei wurden im Wesentlichen zwei Experimente durchgeführt:

1. Einfluss des Rakelwinkels und der Rakelanpresskraft auf das Druckergebnis
2. Einfluss der Fluidviskosität und die Anpresskraft des Gegendruckzylinders auf das Druckergebnis

Die Experimente wurden jeweils über mehrere Stunden durchgeführt und die Druckergebnisse mittels eines Spektralphotometers untersucht. Für das experimentelle Setup wurden Rakel und Rakelhalter mit Temperatursensoren ausgestattet. Die Anpresskräfte wurden pneumatisch erzeugt. In der Studie stellten die Autoren fest, dass sich Rakelwinkel und die Veränderung der Fluidviskosität am stärksten auf das Druckergebnis auswirken. Eine Veränderung der Rakeltemperatur durch den Rakelprozess konnten sie nur in sehr kleinem Ausmaße feststellen, sodass eine Temperaturänderung eher keinen Einfluss auf die Fluidviskosität besaß. Die Viskositätsänderungen des Druckfluids wurde auf die Verdunstung des Lösemittels über die Zeitspanne von mehreren Stunden zurückgeführt und wurde über die Zugabe von Lösemittel nachreguliert. Die Rakelanpresskraft und die Anpresskraft des Gegendruckzylinders wurden pneumatisch erzeugt/eingestellt und im Ergebnis als vernachlässigbar eingestuft. Als Druckfluid verwendeten die

---

Forscher konventionelle Druckfarben, deren rheologische Eigenschaften und Zusammensetzung sie nicht weiter untersuchten.

#### **Kitsomboonloha u. a. (2012)**

Die Arbeit stammt aus dem Bereich des Tiefdrucks zur Herstellung organisch elektronischer Druckerzeugnisse. Hauptmotivation der experimentellen Studie bestand darin, Linienbreiten in der Größenordnung  $< 10\mu\text{m}$  im Tiefdruck abzdrukken. Das experimentelle Setup bestand aus einer flachen Druckform mit unterschiedlichen Npfchengravuren. Das Substrat wurde auf eine Rolle aufgebracht und nach dem Abrakeln bedruckt. Die Studie zeigt, dass das Drucken von Linienbreiten von  $\approx 1\mu\text{m}$  bei einer Geschwindigkeit von  $\approx 1\text{ms}^{-1}$  im Tiefdruck möglich ist. Es werden nicht-newtonsche Polymerlösungen (*poly(4-vinylphenol) in PGMEA*) unterschiedlicher Konzentrationen mit 25-35 %wt = , aber auch newtonsches Silikonöl mit einer Viskosität von  $\eta_{0l} = 29000\text{ mPas}$  verwendet. Die Polymerlösungen sind scherverdnnend, jedoch wurden bei Scherraten von  $10^3\text{ s}^{-1}$  als konstant betrachtet. Die Kapillarzahlen der Prozesse wurden im Bereich von  $Ca = 0,01 - 10$  variiert. Die Studie kommt letztlich zu dem Ergebnis, dass der Rotznaseneffekt bei steigender Kapillarzahl minimiert werden und sogar vollständig unterdrückt werden kann. Die Autoren führen den Effekt auf die Benetzbarkeit der verwendeten Materialien im Rakelprozess zurück, da sie mit einer mit PTFE beschichteten Rakel (d.h. niedrige Oberflächenenergie) den Rotznaseneffekt unterdrücken konnten. Die Autoren identifizierten auch die Schmierfilmdicke als wesentlichen Einflussfaktor auf die Druckqualität und versuchten diesen möglichst zu minimieren.

#### **Lu, Zhang, Li (2013)**

Diese Arbeit untersucht den Einfluss der Reibung im Rakelprozess auf die Druckqualität. Die Reibung zwischen Tiefdruckformzylinder und Rakel hat einen großen Einfluss auf die Druckqualität und die Dauer des Prozesses. Hierbei wurde durch unterschiedliche Rakeleinstellungen der Druckformzylinder verschlissen und den Einfluss auf die Druckqualität untersucht. Die qualitative Untersuchung der Faktoren, die die Reibung zwischen Tiefdruckwalze und Abstreifklinge beeinflussen, wird durchgeführt, um das Wirkungsgesetz der Druckgeschwindigkeit, des Rakelwinkels und der Vibration auf die Reibung zwischen Tiefdruckformzylinder und Rakel zu beschreiben.

#### **Kitsomboonloha, Subramanian (2014)**

In dieser teils numerischen Arbeit, aufbauend auf Kitsomboonloha u. a. (2012), wurden verschiedene Einflussgroen des Rakelprozesses auf die entstehende Schmierfilmdicke untersucht. Die Motivation entstammt ebenfalls der gedruckten organischen Elektronik, bei der es darum geht die Schmierfilmdicke möglichst gering zu halten, um schmale Linien ( $< 10\mu\text{m}$ ) abzdrukken. Als Fluidsystem wurde eine Lösung aus 25-35 %wt poly(4-vinylphenol) in PGMEA

---

verwendet, welche scherverdünnend und somit nicht-newtonsch ist. Die Schmierfilmdicke wurde bestimmt, indem die getrocknete Schicht nach dem Abrakeln mit optischer Reflektrometrie gemessen und über die Polymerkonzentration zurückgerechnet wurde. Es wurde eine planare Druckform aus geätzten Silizium-Wafern verwendet. Ebenfalls wurde der Einfluss der Rakeldicke und des Rakelwinkels auf die Schmierfilmdicke untersucht, jedoch kein signifikanter Zusammenhang festgestellt. Allerdings wurde die Rakelanpresskraft als wichtige Einflussgröße identifiziert, da sie zur Verformung der Rakelfase führt und somit Defekte im Bereich der Kontaktzone ausgleicht und eine gleichmäßige Kontaktzone erzeugt. Die experimentellen Ergebnisse zeigten, dass mit höherer Rakelanpresskraft der Schmierfilm dünner wurde. Mit steigender Rakelgeschwindigkeit wurde der Schmierfilm dicker.

**Miura, Yamamura (2015)** Diese experimentelle Studie stammt aus dem Bereich der Beschichtung mit der Rakel, jedoch wurde sie auf Grund der ähnlichen Prozessparameter hier aufgenommen. In der Studie wurde ein Zusammenhang aus Schmierfilmdicke und Übertragungsvolumen untersucht. Für das experimentelle Setup wurde ein Kammerrakelsystem (siehe Abschnitt 2.1.8) verwendet. Ein weiterer Unterschied zum klassischen Tiefdruck bestand in der Studie darin, dass ebenfalls ein Schlupf zwischen dem Substrat aus PET (Dicke:  $0,25\ \mu\text{m}$ ) und Druckformzylinder eingestellt wurde, sodass bei den untersuchten Kapillarzahlen zwischen Substrat ( $Ca_{web}$ ) und der Kapillarzahl im Rakelprozess  $Ca_{blade}$  unterschieden werden muss. Als Druckformzylinder wurde eine Haschurenwalze verwendet deren Volumenübertragungsverhältnis zwischen 0,2 und 0,8 bei einer Kapillarzahl von  $Ca_{blade} = 0,1$  variiert. Als Fluidsystem wurden wässrige Lösungen von Polyethylenglykol mit unterschiedliche Mischungsverhältnissen (%wt = {20, 35, 50}) verwendet, welche newtonsche Fluideigenschaften aufweisen. Über das Mischungsverhältnis wurde die Viskosität der jeweiligen Lösung variiert ( $\eta = \{19, 87, 375\}$  mPas). Die Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass die Schmierfilmdicke hinter der Rakel mit zunehmender Kapillarzahl abnimmt und sich asymptotisch einer Schmierfilmdicke von  $0,1 \pm 0,6$  mm annähert. Weiter kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass die Haschuren-Gravur mit zunehmender Kapillarzahl mit weniger Fluid befüllt wurde.

**Hariprasad u. a. (2016)**

Die Arbeit bezieht ihre Motivation aus der gedruckten organischen Elektronik und beschäftigt sich mit der Simulation von Schmierfilmdicken, die sich hinter der Rakel einstellen und welche Ursachen es dafür gibt. Mit drei verschiedenen Computermodellen wurden Strömungssimulationen im Rakelkanal durchgeführt und Schmierfilmdicken hinter der Rakel unter verschiedenen Annahmen vorhergesagt. Für ihre Simulationen untersuchen die Autoren die Auswirkung von drei unterschiedlichen Theorien: 1.) Die hydrodynamische Schmierung, bei der die Rakel als fest betrachtet wird, jedoch kein mechanischer Kontakt zwischen Rakel und Tiefdruckform angenommen wird und die Reibungskräfte alleine durch die inneren Reibungskräfte des Fluids



---

entstehen. 2.) Die elastohydrodynamische Schmierung mit fester Rakel und 3.) der Elastohydrodynamik mit deformierbarer Rakel. Die berechneten Vorhersagen der verschiedenen Schmierfilmdicken verglichen sie mit den experimentellen Daten von Kitsomboonloha und Subramanian (vgl. Kitsomboonloha, Subramanian (2014)). Dabei stellten fest, dass ihre berechneten Vorhersagen für die Schmierfilmdicke hinter der Rakel mit den Ergebnissen von Subramanian und Kitsomboonloha übereinstimmten ( $\approx 10 \text{ nm}$ ), wenn sie die Deformierung der Rakelfase zuließen. Für die anderen Fälle lagen die Simulationen um zwei Größenordnungen ( $\approx 1 \mu\text{m}$ ) daneben.

#### **Hoang, Ko (2015)**

In dieser Arbeit wurden sowohl mit einem eigenen ComputermodeLL, als auch experimentell der Rakelprozess für das Drucken feiner Silberlinien optimiert. Dabei wurde auch der Effekt der Rakelanpresskraft auf das Druckergebnis untersucht und ein einfaches Modell ausgestellt. Die Autoren leiteten eine Beziehung aus Rakelgeometrie und Breite des Rakelkanals her und führen Rakelstörungen auf das Verhältnis aus Rakelkanal-Breite und charakteristischer Breite der Gravur her. Dabei führten sie beispielsweise den Rotznaseneffekt auf eine zu niedrige Rakelanpresskraft zurück, die dazu führt, dass Scherkräfte des Fluids die Rakel anheben und so zu einer Überfüllung der Gravur führen. Ungleichmäßig abgedruckte Silberlinien führten die Autoren auf eine zu hohe Rakelanpresskraft zurück, die die Kontaktzone der Rakel in die Gravur hinein presst und so zu einer Unterfüllung der Nüpfchen führt, was sich im Druckbild als verminderter Volumenübertrag äußert. In ihrer Studie stellten die Autoren ebenfalls fest, dass eine Mindestrakelanpresskraft im Tiefdruck eingestellt werden muss, um Rakelauslenkungen zu minimieren und eine gleichmäßige Befüllung der Gravur zu gewährleisten.

#### **Jeon, Kim, Kim (2017)**

Die Studie befasst sich mit der Optimierung des Rakelwinkels. Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, muss zwischen dem Rakelwinkel  $\theta$  und dem effektivem Rakelwinkel  $\theta_{eff}$  unterschieden werden. Für die experimentellen Beobachtungen nutzten die Autoren der Studie einen eigenen Rakelmessstand. Um den Einfluss der Rakelanpresskraft auf die Durchbiegung der Rakel und damit den effektiven Rakelwinkel zu untersuchen, wurden seitliche Kameraaufnahmen der Rakel-Durchbiegung gemacht. Dies wurde ebenfalls für unterschiedliche Auflagepositionen der Rakel am Druckformzylinder untersucht und ein mathematisches Modell abgeleitet den effektiven Rakelwinkel aus rein geometrischen Daten (Rakellänge, Rakeldicke usw.) vorherzusagen.

#### **Hu, Subramanian, Liu (2018)**

In dieser Arbeit wurde das Befüllen von Tiefdruck-Nüpfchen mit Silikonölen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet. Die Autoren haben den Einfluss der Gravurgeometrie und der Kapillarzahl untersucht. Unter der Annahme, dass ebene und zylindrische Tiefdruckformen keinen Unterschied bei der Befüllung machen, wurden dort geätzte Siliziumwafer verwendet.



---

In der Arbeit werden verschiedene Ätzprozesse vorgestellt, mit denen unterschiedliche Gravurgeometrien erzeugt wurden. Aus ihren Ergebnissen schlussfolgerten die Autoren, dass für Kapillarzahlen im Bereich von  $0,1 < Ca < 1$  nur eine Teilbefüllung der Gravuren stattfindet.

**Tjiptowidjojo, Hariprasad, Schunk (2018)**

Die Arbeit baut auf der Arbeit von Hariprasad von 2016 auf. Es handelt sich um eine mit Goma 6.0 durchgeführte FEM-Simulation zur Vorhersage der Schmierfilmdicke unter der Rakel. In dieser Arbeit wurde das Modell von Hariprasad auf ein dreidimensionales verformbares Modell der Rakel mit einer zweidimensionalen Strömung auf der Rakeloberfläche erweitert. Für das Modell wurden verschiedene Formen für die Rakelfase angenommen und die Schmierfilmdicke für unterschiedliche Rakelgeschwindigkeiten berechnet. Als Ergebnis bestätigen die Autoren die Aussage, dass die Schmierfilmdicke newtonscher Fluide bei langsamen Rakelgeschwindigkeiten dünner ist. Die Simulationen zeigen, dass der Druckverlauf im Rakalkanal zwischen Rakel und Druckform je nach Geometrie der Kontaktzone sehr kompliziert sein kann und es Bereiche der Rakel gibt, die auf Grund des Staudrucks von der Druckform weg gedrückt werden und andere Bereiche gibt, die zwischen Rakel und Druckform eine anziehende Kraft aufweisen.

Das folgende Kapitel behandelt die wissenschaftliche Vorgehensweise, bei der das experimentelle Setup, die Experimentanordnungen und die Durchführung von Experimenten präsentiert werden.

---

### 3 Experimentelle Vorgehensweise

---

Das folgende Kapitel behandelt das experimentelle Vorgehen in dieser Arbeit. In Abschnitt 2.4 wurden einige experimentelle und theoretische Arbeiten zum Rakelprozess aus der Literatur vorgestellt und zusammengefasst. Es wurde gezeigt, dass in diesen Arbeiten auf verschiedene Arten versucht wurde den Rakelprozess auf wenige Haupteinflussfaktoren zu reduzieren. Die experimentellen Vorgehensweisen in diesen Arbeiten unterscheiden sich oft so stark voneinander, dass es nicht eindeutig ist, inwiefern die dort präsentierten Ergebnisse miteinander verglichen werden können. Teil dieser Arbeit ist es weitere Möglichkeiten zu finden, die immer wieder genannten Haupteinflussparameter des Rakelprozesses zu überprüfen bzw. zu identifizieren, sofern sich der Rakelprozess auf solche reduzieren lässt.

Zunächst wird das Konzept einer neuartigen Versuchsplattform, der Rakelmessstand, präsentiert (siehe Abschnitt 3.1.1), dessen Konzept sich an einem praxisnahen Rakelprozess im Tiefdruck orientiert. Es wird der Aufbau und die Funktionsweise des Rakelmessstands präsentiert. Ergänzend wird in Abschnitt 3.1.3 ein für den Rakelmessstand entwickelter transparenter Hohlzylinder vorgestellt, der die Beobachtung der Rakel und der Druckformoberfläche aus der Perspektive des Inneren des Druckformzylinders ermöglicht. Die verwendete Messtechnik, die Hochgeschwindigkeitskamera und die verwendeten Objektive werden in Abschnitt 3.2 beschrieben. In Abschnitt 3.3 wird die gesamte Experimentanordnung behandelt. Für die Durchführung der jeweiligen Experimente wurden eigene Experimentkategorien entwickelt und werden in Abschnitt 3.3.1 vorgestellt. Im Hauptteil dieses Kapitels, in Abschnitt 3.4, werden die experimentellen Methoden und die Durchführung derselbigen beschrieben. Zunächst werden die verwendeten Fluide rheologisch untersucht. Für die in den Abschnitten 3.1.1 und 3.3.1 beschriebenen Werkzeugen und Methoden und ihrer Kombination (Abschnitt 3.3) wurden Experimente entwickelt und durchgeführt, die den Einfluss der immer wieder auftauchenden Haupteinflussgrößen des Rakelprozesses quantifizieren sollen. Hierzu gehören:

- Einfluss der Rakelanpresskraft
- Einfluss der Fluidviskosität
- Einfluss der Gravur
- Einfluss der Kapillarzahl

---

Die vorgestellten Methoden und Vorgehensweisen sind grundsätzlich nicht neu, jedoch wurden sie in dieser Kombination nie zur Untersuchung des Rakelprozesses im Tiefdruck eingesetzt. Es soll gezeigt werden, dass dieser Ansatz zu neuen Erkenntnissen beitragen kann.

---

### 3.1 Rakelmessstand

---

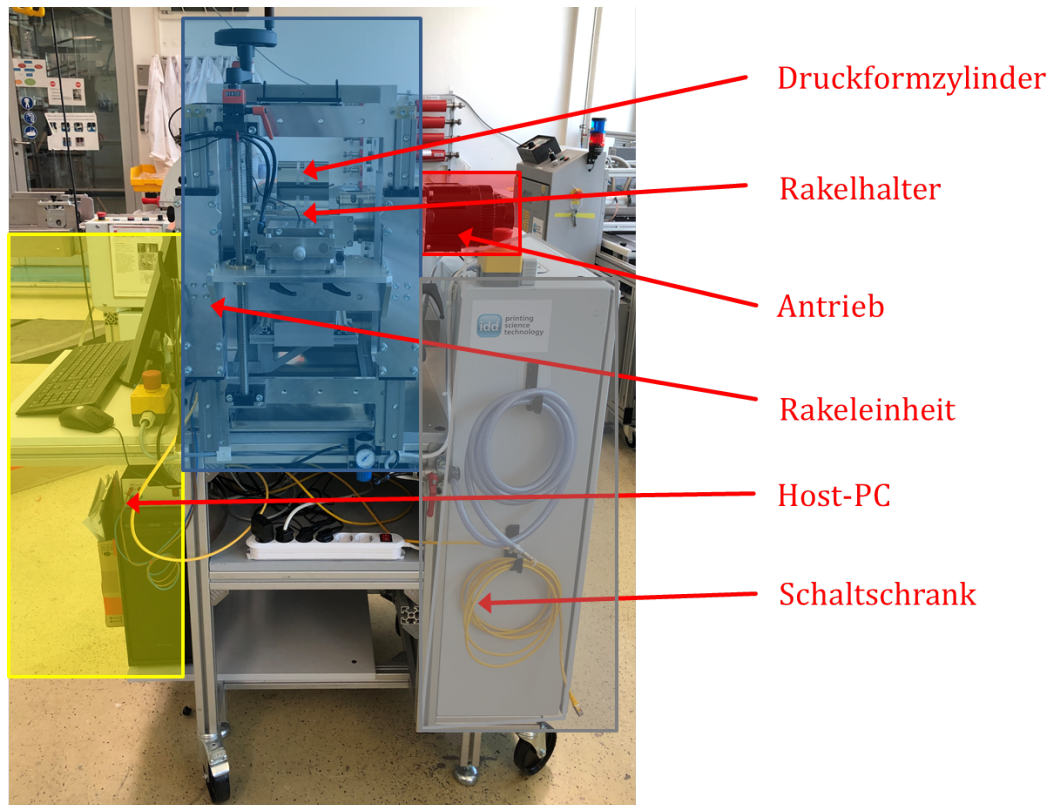
Im folgenden Teilabschnitt werden die entwickelten und verwendeten Werkzeuge und Methoden zur Durchführung der Experimente vorgestellt. Dabei werden der entwickelte Rakelmessstand und seine technischen Eigenschaften behandelt. Weiter werden zusätzliche Komponenten vorgestellt, zu denen die verwendete Rakel und Druckform gehören. Am Ende dieses Teilabschnitts wird auf Seite 49 der Prototyp eines transparenten Hohlzylinders vorgestellt, der im Rahmen studentischer Arbeiten entwickelt wurde und einen durchsichtigen Zylindermantel besitzt.

---

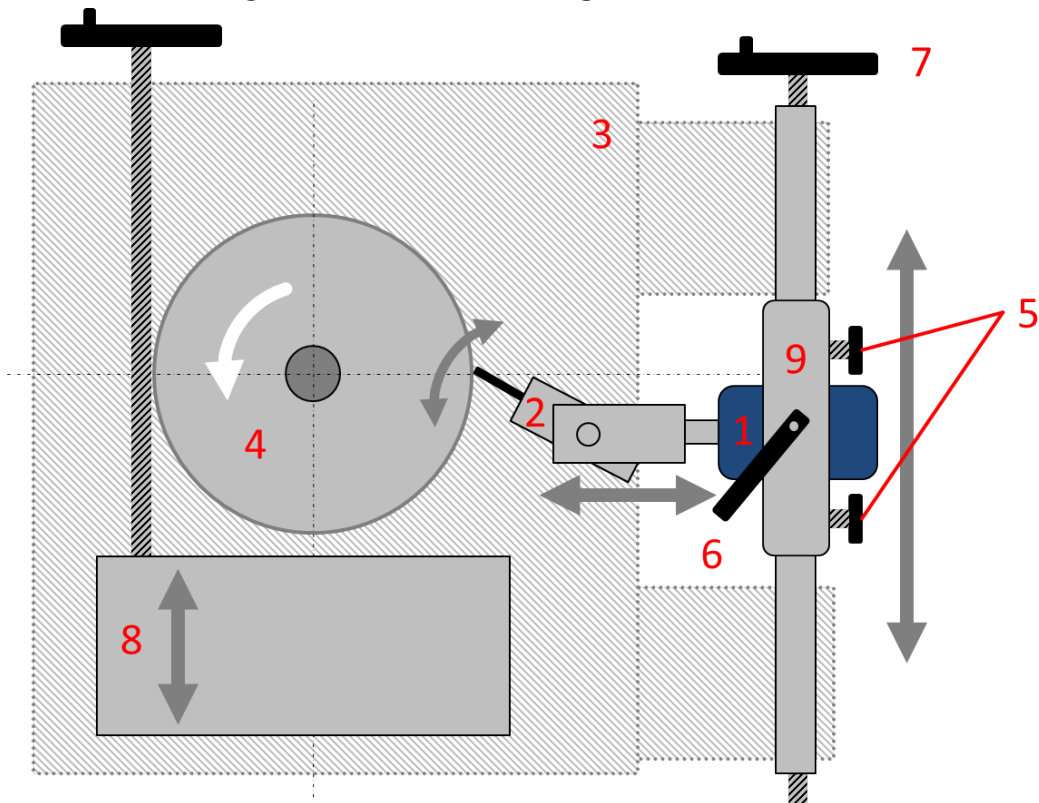
#### 3.1.1 Konstruktiver Aufbau

---

Zur Untersuchung des Rakelprozesses wurde in einer betreuten studentischen Masterarbeit von Melsa (2018) ein Rakelmessstand konzeptioniert, konstruiert und gebaut. Als Grundlage bestand ein bereits vorhandener Messstand zur Untersuchung von Lösemittelbeständigkeit von Flexodruckformen (vgl. Nienhaus (2012); Theopold (2014)). Der Rakelmessstand ist dem Funktionsprinzip einer Tiefdruckmaschine nachempfunden. Er besitzt jedoch keinen Gegendruckzylinder und auch keine Möglichkeit Druckfluid auf ein Substrat zu übertragen. In Abbildung 14 ist eine Gesamtübersicht des Rakelmessstands aus der Frontalansicht zu sehen. Abbildung 15 zeigt eine schematische seitliche Darstellung des Rakelmessstands. Ziel bei der Beschaffung und Aufbau einer solchen Versuchsplattform war es, den Rakelprozess am Beispiel des Tiefdrucks so praxistreu wie möglich nachzustellen und gleichzeitig die Möglichkeit zur Erforschung des Rakelprozesses zu ermöglichen. Der mechanische Teil des Rakelmessstands besteht aus *Rakelhalter*, *Rakeleinheit*, einem *Druckformzylinder* und den dafür notwendigen *Antrieb*. Die Rakeleinheit erlaubt eine präzise Positionierung des Rakelhalters an verschiedenen Stellen des Druckformzylinders. Der Rakelhalter ermöglicht die Verwendung jeder erhältlichen kommerziellen Rakel. Zusätzlich befinden sich zur Ansteuerung elektronische Schaltschränke, sowie ein Host-PC am Rakelmessstand. Aussparungen am Maschinenrahmen erlauben ein freies Sichtfeld seitlich auf den Rakelhalter mit der Rakel. (vgl. Bitsch u. a. (2019b))



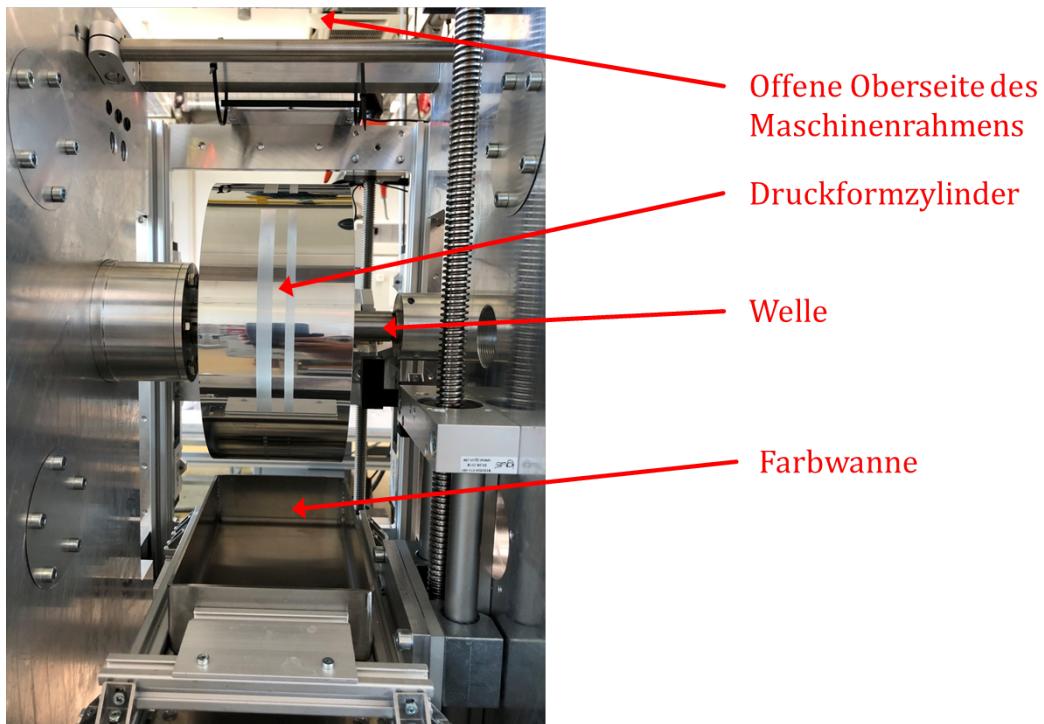
**Abbildung 14:** Frontalansicht des gesamten Rakelmessstands.



**Abbildung 15:** Schematische Darstellung des Rakelmessstands von der Seite

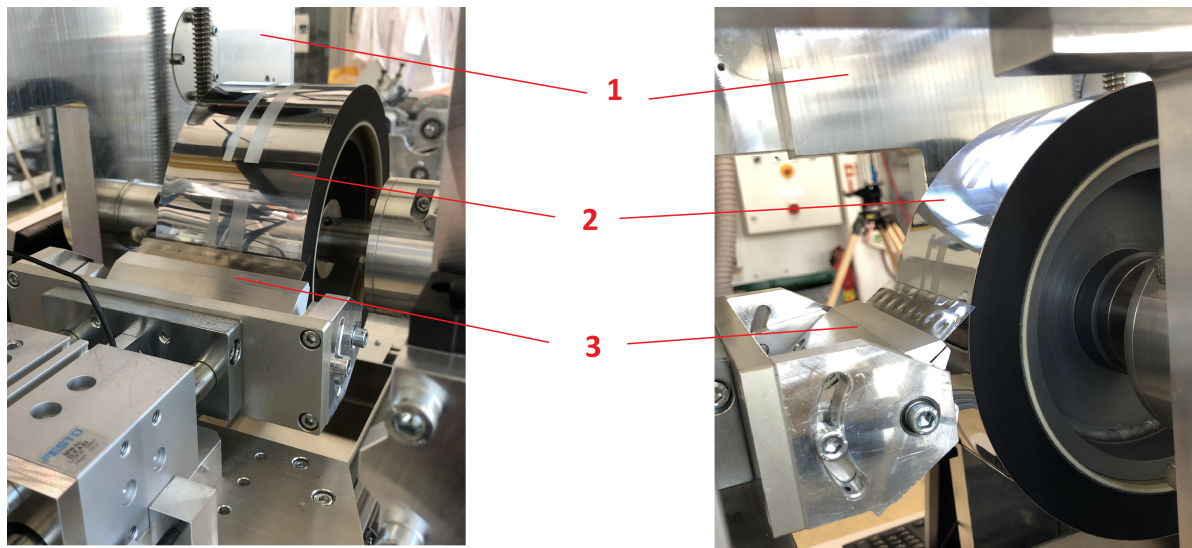
1: Pneumatik-Führungszylinder; 2: Rakelhalter mit Rakel; 3: Maschinenrahmen; 4: Druckformzylinder; 5: Klemmschrauben; 6: Handklemmung; 7: Gewindespindel zur vertikalen Positionierung der Rakeleinheit; 8: Farbwanne mit Gewindespindel; 9: Führungswagen

Eine Aussparung an der Oberseite des Maschinenrahmens erlaubt freien Zugang zur Oberseite des Druckformzylinders, sodass sich beispielsweise mit einer Pipette Fluid auf den Druckformzylinder aufbringen lässt. Zum Reinigen der Druckform kann an der Rückseite des Rakelmesstands eine Klappe geöffnet werden, sodass man freien Zugang zur Rückseite des Druckformzylinders hat. Dies ist in Abbildung 16 zu erkennen, welche die Rückansicht in das Innere des Maschinenrahmens zeigt. Es ist ebenso die Farbwanne mit Gewindespindel zu ihrer Positionierung zu sehen.



**Abbildung 16:** Rückansicht in das Innere des Maschinenrahmens



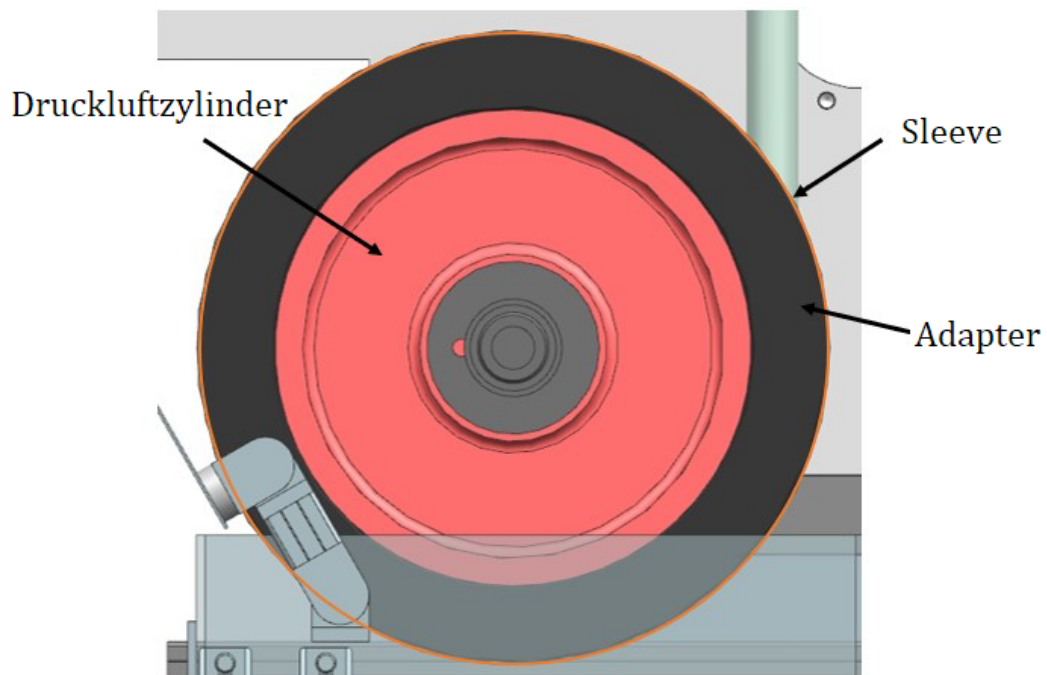


**Abbildung 17:** Frontaler und seitlicher Blick auf den Rakelhalter, der die Rakel unter einem unbestimmten Rakelwinkel auf dem Druckformzylinder drückt. Zu sehen sind 1: Maschinenrahmen; 2: Druckformzylinder; 3: Rakelhalter mit eingespannter Rakel; links: leicht schräge Frontalansicht; rechts: seitliche Ansicht

Abbildung 17 zeigt die Frontalansicht (links) und die seitliche Ansicht (rechts) des Rakelhalters und des Druckformzylinders, der auf einer Welle sitzt. Der Servomotor treibt die Welle an. Er erlaubt eine Drehzahlregelung und kann trotz Laständerung, zum Beispiel durch Anstellen der Rakel mit hoher Rakelanpresskraft, die Drehzahl konstant halten. Das Drehmoment des Servomotors wird über die elektrische Leistung erfasst. Der vorhandene Motor für den Druckformzylinderantrieb ist ein Servomotor SGMGV-13D3A6H vom Hersteller Yaskawa. Er besitzt eine Nenndrehzahl von 1500 Umdrehungen/min und erfüllt damit die erforderliche Drehzahl um den Tiefdruck simulieren zu können. Das Anlaufmoment, das durch die maximale Haftreibung der trockenen Rakel am Druckformzylinder bei maximaler Rakelanpresskraft von 400 N mit 6,6 Nm ermittelt wurde, kann durch das Nenndrehmoment des Motors von 8,34 Nm überwunden werden. (vgl. Melsa (2018))

Auf der Welle befindet sich der Druckformzylinder. Abbildung 18 ist eine schematische Darstellung des Druckformzylinders zu sehen. Dieser besteht aus einem *Druckluftzylinder*, einem *Adapter* und der *Sleeve*. Der Adapter besteht aus einem Kohlefaserverbundmaterial und wurde vom Hersteller Polywest gefertigt. Das Sleeve besteht aus einer verchromten Nickelhülse, die einen anderen Wärmeausdehnungskoeffizient als der Adapter. Das Sleeve wird thermisch auf den Adapter aufgezogen, indem der Adapter auf unter 0 °C abgekühlt wird und seinen Durchmesser dadurch verringert. Im thermischen Gleichgewicht sitzt das Sleeve fest auf dem Adapter. Der Adapter wird mittels Druckluft auf den Druckluftzylinder aufgezogen. Dieser wird mit Schraubschellen auf der Welle befestigt. Durch die Verwendung der Sleeve-Technologie lässt sich die Druckform vergleichsweise leicht auswechseln, da kein kompletter Druckformzylinder

gefertigt werden muss. In Tabelle 3 sind die Eigenschaften des Druckformzylinders als Übersicht aufgeführt.



**Abbildung 18:** Schematische Darstellung des Druckformzylinders (angelehnt an Melsa (2018))

**Tabelle 3:** Eigenschaften des Druckformzylinders

Nr.	Bezeichnung	Wert
1	Dicke Sleeve	0,5 mm
2	Durchmesser Druckluftzylinder	165 mm
3	Außendurchmesser Adapter	192 mm
4	Rundlaufgenauigkeit	< 0,01 mm

Im Gegensatz zu einer realen Tiefdruckmaschine hat der Rakelmessstand keinen Gegendruckzylinder, der ein Drucksubstrat gegen den Tiefdruckformzylinder presst. Somit existieren auch kein Druckspalt, kein Drucksubstrat und es handelt sich bei dem Rakelmessstand nicht um eine Druckmaschine.

Die Rakeleinheit ist mit dem Maschinenrahmen verschraubt und hat die Aufgabe den Pneumatik-Führungszyylinder mit Rakelhalter vertikal zu führen, so dass die Rakel an unterschiedlichen Stellen des Druckformszylinders positioniert werden kann.

Die Eigenschaften der Rakeleinheit sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die Rakeleinheit samt Rakelhalter und den weiteren Komponenten sind in Abbildung 19 schematisch dargestellt. Der Rakelhalter mit Pneumatik-Führungszyylinder wird über eine Gewindespindel vertikal verschoben.

Der Führungszylinder presst pneumatisch den Rakelhalter gegen den Druckformzylinder und erzeugt so die Rakelanpresskraft. Kernstück dieses Systems bilden ein Führungszylinder DMF-32-25-P-A-KF und ein Proportional-Druckregelventil VPPM-6L-L-1-G18-OL6H-V1P-S1C1 der Firma Festo. Über das Proportional-Druckregelventil kann über ein Eingangssignal von 0 - 10 V der gewünschte Druck eingestellt werden. Die Eigenschaften des Rakelhalters sind in Tabelle 4 aufgeführt. Über den eingestellten Druck wird mittels des Führungszylinders die gewünschte Rakelanpresskraft erzeugt. Das Eingangssignal zur Steuerung des Proportional-Druckregelventils wird durch ein Spannungsausgabemodul von National Instruments erzeugt. Mit dem Führungszylinder kann bei einem Druck von 6 bar eine Kraft von 482 N erzeugt werden, was bei einer Zylinderbreite von 80 mm eine Rakelanpresskraft von  $> 6 \text{ N/mm}$  ergibt. (vgl. Melsa (2018))

Der Rakelhalter ist so angebracht, dass die Rakel unter einem definierten Winkel zur Druckformoberflächentangente angestellt werden kann. Der Rakelwinkel wird über einen externen digitalen Winkelmesser bestimmt. Die Führungswagen vom Typ TW-01-25-HKA der Fa. Igus, können über zwei Handklemmungen und zusätzlich über jeweils zwei Klemmschrauben festgeklemmt werden, so dass sich der Rakelhalter anschließend nicht mehr vertikal verschieben lässt. Zusätzlich lassen sich mit Magneten Spritzschutzbleche anbringen. Eine Farbwanne kann über eine Gewindespindel von unten an den Druckformzylinder angefahren werden, sodass sich ungefähr ein Drittel des Druckformzylinders in der Farbwanne befindet.

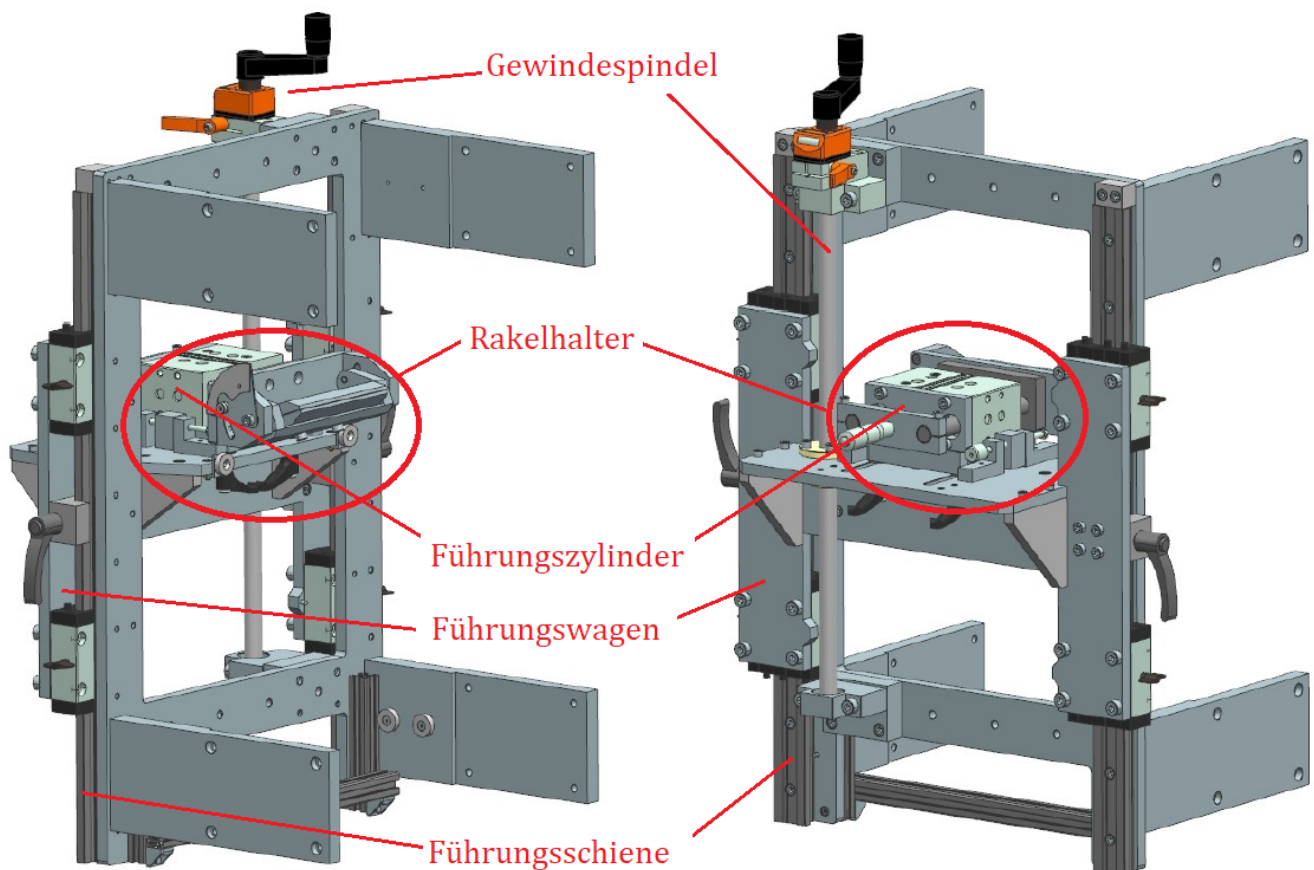
**Tabelle 4:** Eigenschaften des Rakelhalters

Nr.	Bezeichnung	Wert
1	Eignung für Rakelbreite	25 mm
2	Eignung für Rakellänge	(10 – 60) mm
3	mögliche Rakelstärken	(0,1 – 0,3) mm
4	Stützrakel	möglich

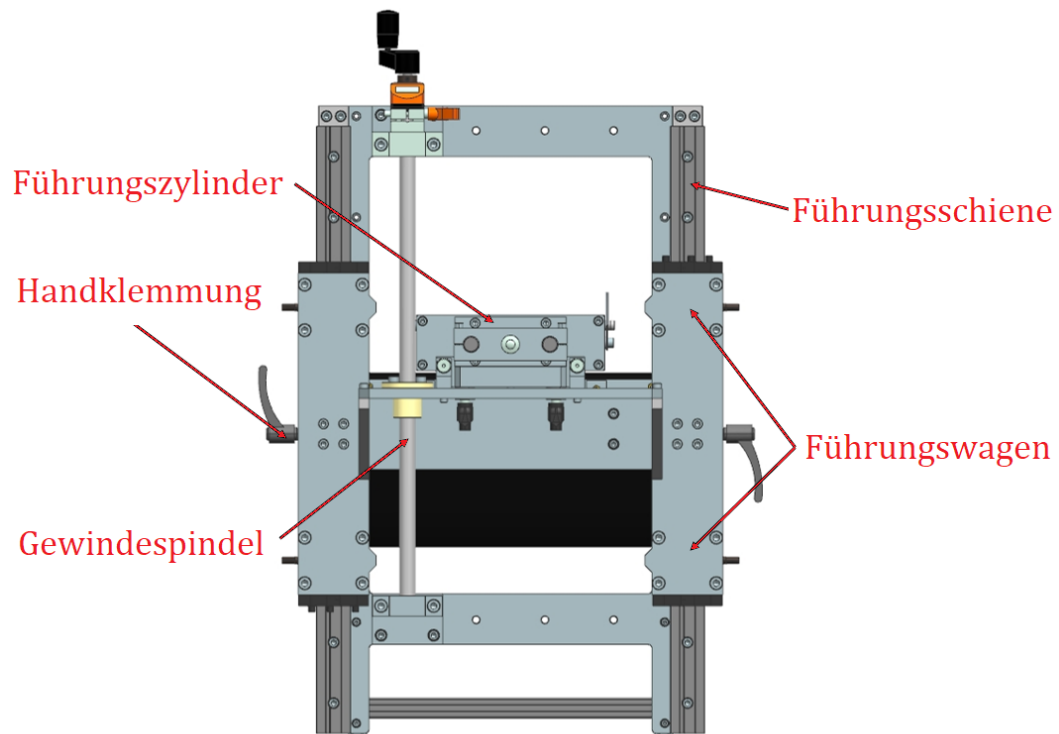


**Tabelle 5: Eigenschaften der Rakeleinheit**

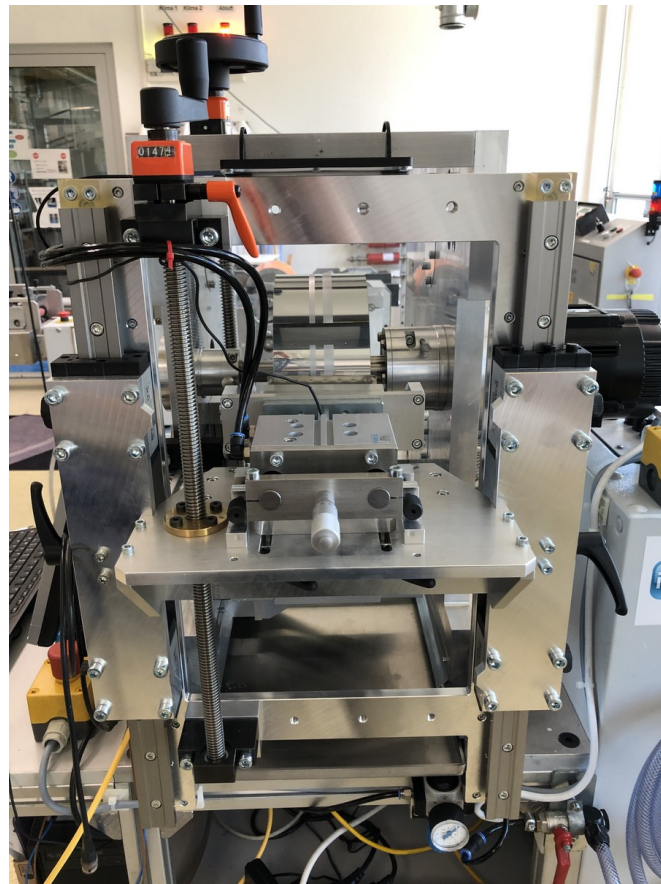
Nr.	Bezeichnung	Wert
1	Rakelanpresskraft	$> 0$ bis $1 \text{ N mm}^{-1}$
2	Regulierung Rakeldruck	stufenlos einstellbar
3	Anbringung Kraftsensor zur Messung von Rakeldruck möglich	vorhanden
4	Rakelwinkel	$0^\circ$ bis $90^\circ$
5	Einstellung Rakelwinkel	stufenlos
6	Genauigkeit Rakelwinkel	$\pm 1^\circ$
7	Negativer Rakelwinkel	$0^\circ$ bis $-30^\circ$
8	Feinjustierung für Rakelparallelität	$> 1^\circ$
9	Rakelposition am Druckformzylinder	horizontale Anbringung
10	Positionierung Rakelhalter	$90^\circ$ um Druckformzylinder positionierbar



**Abbildung 19: Schematische Darstellung der Rakeleinheit (entnommen aus Melsa (2018))**



**Abbildung 20:** Schematische Darstellung der Frontalansicht der Rakeleinheit (entnommen aus Melsa (2018))



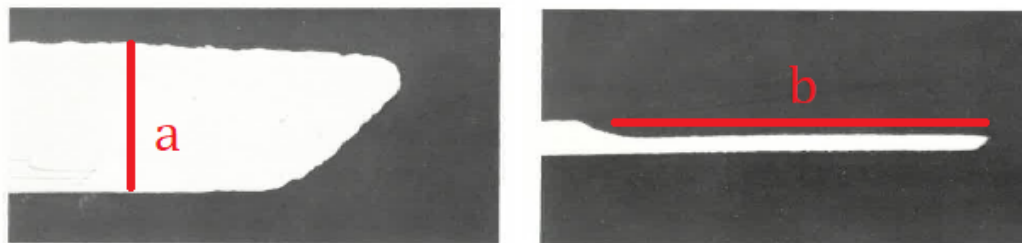
**Abbildung 21:** Frontalansicht der Rakeleinheit

---

### 3.1.2 Zusätzliche Komponenten

---

Zusätzlich zu den mechanischen vier Hauptkomponenten (Rakeleinheit, Rakelhalter, Antrieb und Druckformzylinder), die die Grundfunktionen des Rakelmessstands erfüllen, wurden noch weitere notwendige Zusatzkomponenten am Rakelmessstand angebracht. Ein Host-PC steuert den Antrieb, die Pneumatik und ein externes 24 V-Netzteil zur Stromversorgung weiterer Geräte (Lichtquelle). Außerdem dient der Host-PC der Datenspeicherung für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und besitzt über einen internen SSD-Speicher mit einer Größe von über einem Terrabyte. Die Steuerung des Antriebs und der Pneumatikeinrichtung erfolgt mittels LabVIEW (Version 17.0f2 (32-bit)) über einen Mikrocontroller (CompactRIO von National Instruments). Der Rakelmessstand wurde außerdem mit diversen Sicherheitsvorkehrungen ausgestattet. Hierzu zählt, dass die Stromzufuhr zum Antrieb durch mehrere Not-Aus-Schalter unterbrochen werden kann. Außerdem lässt sich mit einem Regelventil der Pneumatikzylinder der Rakeleinheit verriegeln, sodass gefahrlos an der Rakeleinheit gearbeitet werden kann. Für die Experimente wurden Standard-Lamellenrakel aus Stahl der Fa. Daetwyler verwendet. Bei einigen Experimenten wurden transparente Rakel aus PEN-Folie verwendet. In Abbildung 22 ist ein Querschnitt einer Lamellenrakel abgebildet. Die Lamelle hat eine Länge von  $b = 165 \text{ mm}$  und eine Dicke von  $a = 150 \text{ }\mu\text{m}$  (s. Abbildung 22).

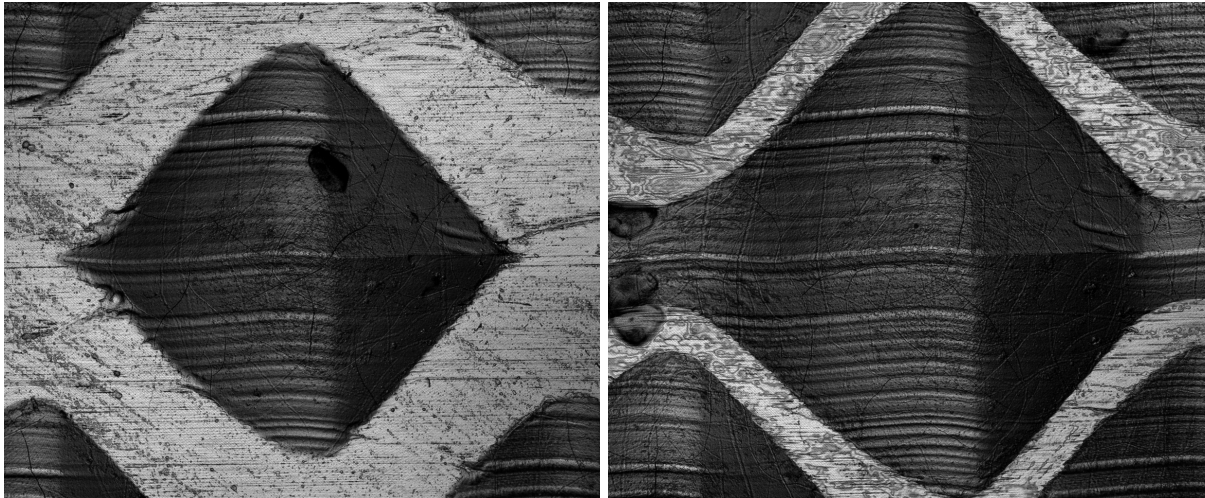


**Abbildung 22:** Querschnitt einer Standard-Lamellenrakel. (angelehnt an Ollech (1993)).  
 $a = 150 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $b = 165 \text{ mm}$

Als Druckform wird ein Sleeve mit einer Rasterweite 40 L/cm des Herstellers SWG - *Sächsische Walzengravur* verwendet. Das bedeutet, dass die Zentren der Näpfchen einen Abstand von  $250 \text{ }\mu\text{m}$  haben. Auf dieser Druckform befindet sich ein graviertes Bereich mit einem Tonwert von 80 % und ein Bereich mit einem Tonwert von 100 %. Die Gravuren wurden mit einem Diamandstichel mit Stichelwinkel von  $120^\circ$  und einem Rasterwinkel von  $37^\circ$  hergestellt. Zusätzlich befinden sich auf der Druckform komplett ungravierte Bereiche, sodass der Rakelprozess auch ohne Gravuren, also auf Bereichen mit einem Tonwert von 0 %, untersucht werden kann. In Abbildung 23 sind Näpfchen aus dem jeweiligen gravierten Bereich abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass zwischen den Näpfchen aus der Gravur mit 100 % Tonwert über einen

---

Durchstich miteinander verbunden sind, wohingegen zwischen den Näpfchen der 80 % Tonwert-Gravur die klar begrenzenden Stege zu erkennen sind.



**Abbildung 23:** Links: Gravur-Näpfchen mit 80 % Tonwert; Rechts: Gravur-Näpfchen mit 100 % Tonwert

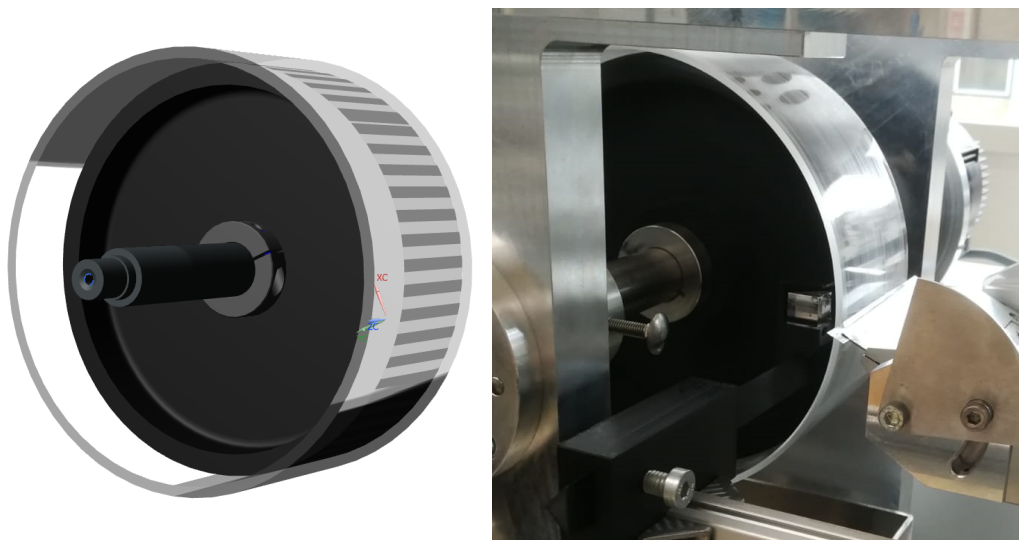


---

### 3.1.3 Transparenter Hohlzylinder

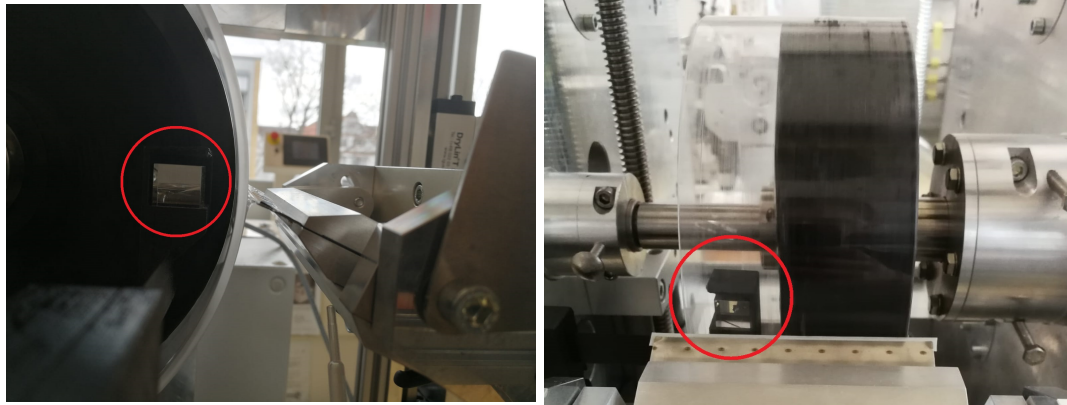
---

Ziel der Konzeptionierung des Rakelmessstands bestand in der Schaffung großer Bauräume, um die Rakel aus verschiedenen Perspektiven mit optischer Messtechnik erfassen zu können. Eine Möglichkeit ist, die Rakel aus der Perspektive des Zylinderinneren durch den Zylindermantel hindurch zu beobachten. Dies ist bei klassischen Tiefdruckformen nicht möglich, da diese in der Regel aus optisch nicht leitfähigen Materialien bestehen. Um die Rakelfase, den Fluidmeniskus und die Kontaktzone aus der Perspektive des Zylinderinneren beobachten zu können, wurde ein Hohlzylinder aus transparentem *Polymethylmetacrylat* (kurz: *PMMA*) der Fa. Evonik gefertigt. Um den PMMA-Zylinder mit der Antriebswelle des Rakelmessstands zu verbinden, wurde ein Adapter aus *Polylactid* (kurz: *PLA*) additiv gefertigt und mit dem Hohlzylinder verklebt. Abbildung 24 zeigt die schematische Darstellung und den gefertigten Prototypen des transparenten Hohlzylinders. Der transparente Hohlzylinder hat den gleichen Umfang wie die ebenfalls verwendeten Tiefdruckformzylinder und kann optional verwendet werden.



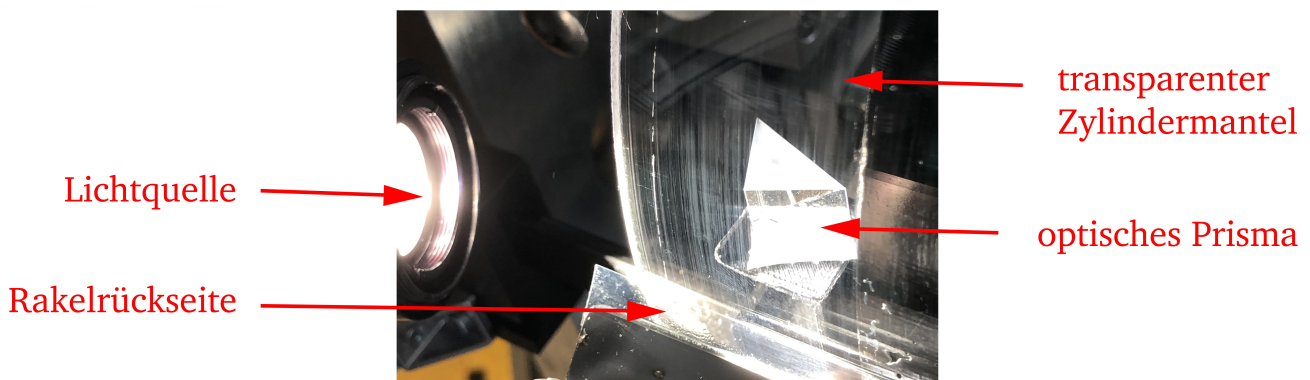
**Abbildung 24:** Links: Schematische Darstellung des transparenten Hohlzylinders (entnommen aus Pflüger (2019)); Rechts: Prototyp, eingebaut im Rakelmessstand

Innerhalb des transparenten Zylindermantels kann ein optisches Prisma angebracht werden, das aus seitlicher Beobachtungsperspektive den optischen Strahlengang so umlenkt, dass die Rakel durch den Zylindermantel hindurch beobachtet werden kann. Das Prisma wird hierzu auf einer Halterung angebracht, die am Maschinenrahmen befestigt ist und seitlich in den transparenten Hohlzylinder ragt. Der optische Strahlengang verläuft so, dass ein optischer Eindruck entsteht, als würde sich die Kamera im Inneren des Zylinders befinden und die Rakelfase aus dem Zylinderinneren beobachten. Abbildung 25 zeigt die seitliche und die frontale Sicht auf den eingebauten transparenten Hohlzylinder mit eingesetztem optischen Prisma.



**Abbildung 25:** Links: Seitliche Aufsicht auf den transparenten Hohlzylinder;  
Rechts: Frontalperspektive auf den transparenten Hohlzylinder.  
Das optische Prisma ist mit einem roten Kreis markiert.

Das optische Prisma kann sowohl als Umlenkoptik zur Beobachtung, als auch der Ausleuchtung der Rakelunterseite eingesetzt werden. Abbildung 26 zeigt wie der Strahlengang einer Lichtquelle von dem Prisma durch den transparenten Zylindermantel auf die Rakelkante gelenkt wird. Da es sich bei dem Zylindermantel um zwei gekrümmte optische Grenzflächen mit einem zur Luft unterschiedlichen Brechungsindex handelt, muss von optischen Verzerrungen ausgegangen werden. Pflüger (2019) hat in seiner Bachelorarbeit diese Frage untersucht und kam zu dem Ergebnissen, dass der beobachtete Bereich klein genug ist, um die Krümmung des Zylindermantels vernachlässigen zu können.



**Abbildung 26:** Das optische Prisma lenkt den Strahlengang von der Seite durch den Mantel des transparenten Hohlzylinder.

---

## 3.2 Verwendete Messtechnik

---

In dem folgenden Teilabschnitt werden die verwendeten Messtechniken beschrieben. Um an dem zuvor beschriebenen Rakelmessstand Experimente mit der Hochgeschwindigkeitskamera durchführen zu können, muss zusätzliche Ausstattung verwendet werden. Dabei geht es um die Aufnahme der Hochgeschwindigkeitsdaten sowie der Datenweiterverarbeitung. Für die optische Erfassung des Rakelprozesses wird eine Hochgeschwindigkeitskamera mit Vergrößerungsoptiken und getriggelter Lichtquelle kombiniert.

---

### 3.2.1 Hochgeschwindigkeitskamera

---

Für die Durchführung der Experimente wird eine Hochgeschwindigkeit Fastcam SA4 (Modell 500 K - M1) des Herstellers PHOTRON verwendet. Die Kamera besitzt einen monochromen CMOS-Sensor und einen internen Speicher mit einer Datenkapazität von 8 Gigabyte. Die maximale zeitliche Auflösung des Systems beträgt  $5 \cdot 10^6$  Bilder/Sekunde (engl. frames /second; fps). Der CMOS-Sensor hat eine räumliche Ausdehnung von ca.  $20 \cdot 20 \text{ mm}^2$ . Die Bildauflösung beträgt maximal  $1024 \cdot 1024$  Pixel, wobei diese bei größerer zeitlicher Auflösung reduziert wird. Bei einer Bildrate von 500.000 fps beträgt die Bildauflösung nur noch  $128 \cdot 16$  Pixel. Die wichtigsten Kameraeigenschaften wurden in Tabelle 6 zusammengefasst.

**Tabelle 6:** Eigenschaften der verwendeten Hochgeschwindigkeitskamera (PHOTRON (2009); Griesheimer (2013))

Kameraparameter	Wert
Hersteller	PHOTRON
Typ	Fastcam SA4
Modell	500 K - M1
Sensor	CMOS 12-bit monochromatisch
Sensorgröße	$20 \cdot 20 \text{ mm}^2$
Pixelgröße	$20 \text{ }\mu\text{m}$
interne Speicherkapazität	8 GB
max. Bildrate; zeitl. Auflösung	500.000 fps
max. Auflösung	$1024 \cdot 1024 \text{ px}$
max. Verschlusszeit (shutter time)	$1 \text{ }\mu\text{s}$

---

### 3.2.2 Verwendete Optiken

---

Die präsentierten Beobachtungen und Experimentaufnahmen wurden mit einem Objektiv der Firma Canon durchgeführt. Das Objektiv Canon EF 180 mm /3,5 L USM Macro hatte sich in den Experimenten als geeignet herausgestellt, da es den guten Kompromiss aus Tiefenschärfe und Vergrößerung lieferte. Allerdings musste das Objektiv mit einem C-Mount-Adaper an die Hochgeschwindigkeitskamera adaptiert werden, was dazu führte, dass der gesamte Kamerasensor an den Rändern nicht optimal ausgeleuchtet wurde. Dies hat sich in den Experimenten nicht als nachteilig herausgestellt.

---

### 3.2.3 Verwendete Lichtquelle

---

Als Lichtquelle wurde ein gepulstes LED-Panel RT220-2 von Gardasoft Vision verwendet. Die Kamera kann über ein Koaxialkabel getriggert und zusätzlich über eine Ethernetschnittstelle über einen Host-PC konfiguriert, aber auch angesteuert werden. In Tabelle 7 sind die Eigenschaften des verwendeten LED-Panels aufgeführt. Die Lichtquelle hat zwei Output-Kanäle, sodass es möglich ist über ein Triggersignal zwischen zwei Intensitätsstufen zu schalten. Das Triggersignal ermöglicht es gepulstes Licht zu emittieren. Dies erlaubt Lichtsignale mit deutlich höherer Intensität bei gleichbleibender Lichtleistung, sodass das Panel nicht beschädigt wird.

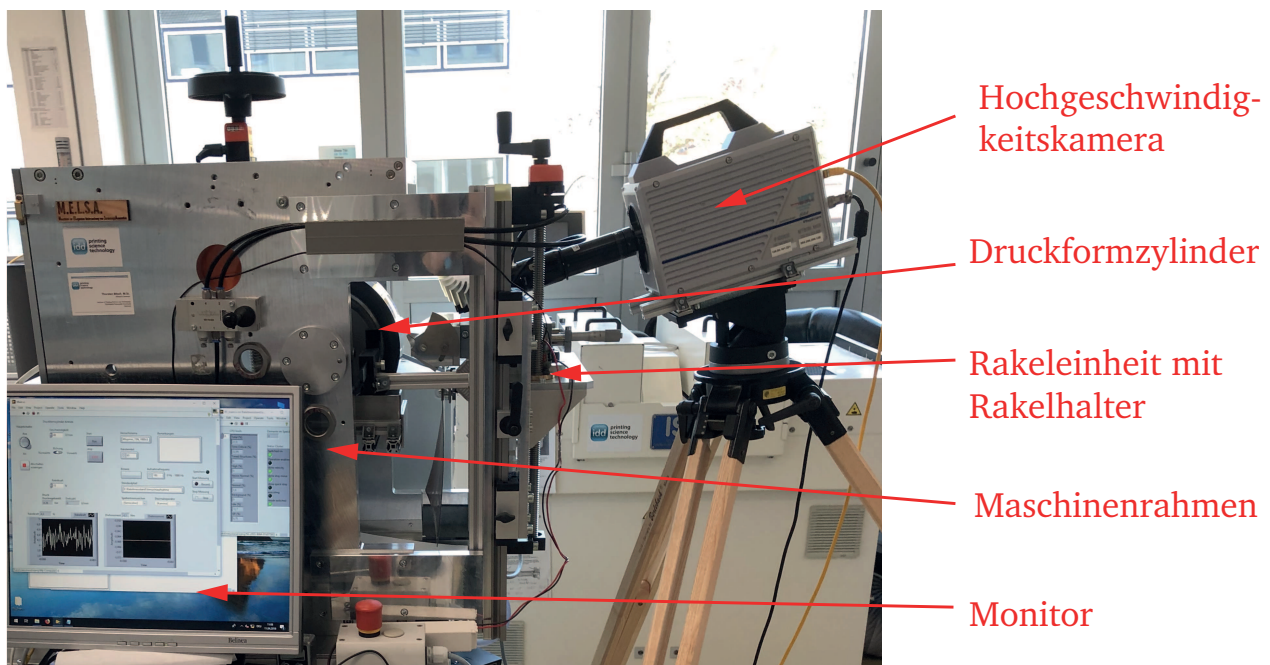
**Tabelle 7:** Eigenschaften der verwendeten Lichtquelle

Parameter	Wert
Hersteller	Gardasoft Vision
Typ	RT220-2
Leistung	30 W
min. Pulsbreite	1 $\mu$ s
Versorgungsspannung	24 V - 48 V
Delay zwischen Trigger/Puls	20 $\mu$ s - 999 ms



### 3.3 Gesamter Experimentaufbau

In diesem Abschnitt wird der gesamte verwendete Experimentaufbau, also die Zusammenführung des Rakelmessstands sowie der verwendeten Messtechnik beschrieben. Der gesamte Experimentaufbau besteht aus dem Rakelmessstand mit eingesetztem Druckformzylinder/transparentem Hohlzylinder, Steuerungselektronik, Host-PC, Hochgeschwindigkeitskamera mit Objektiv und der für die Experimente erforderlichen Lichtquelle. Für die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Experimente wurde die Kamera auf einem Kameradreibein montiert. Dies erlaubte die flexible Positionierung der Hochgeschwindigkeitskamera neben und vor dem Rakelmessstand, was für die Experimentanordnungen in Abschnitt 3.3.1 eine Grundvoraussetzung war. Auch war die freie Positionierbarkeit der Hochgeschwindigkeitskamera notwendig. Somit können unter Verwendung des transparenten Hohlzylinders zentralperspektivische Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, als auch von der Frontalansicht, die Rakelrückseite aufgezeichnet werden. Die Lichtquelle wurde ebenfalls auf einem Dreibein montiert, sodass diese für die Hochgeschwindigkeitskamera sehr wichtige Ausleuchtung des zu untersuchenden Objektes mit maximaler Flexibilität positioniert und ausgerichtet werden kann. Abbildung 27 zeigt die seitliche Ansicht des Rakelmessstands mit frontal aufgestellter Hochgeschwindigkeitskamera. Es ist ebenfalls in Abbildung 27 zu erkennen, dass von der Seite des Rakelmessstands der Druckformzylinder und die Rakelhalterung mit Rakel beobachtet werden können.



**Abbildung 27:** Seitliche Ansicht des Rakelmessstands mit aufgestellter Hochgeschwindigkeitskamera

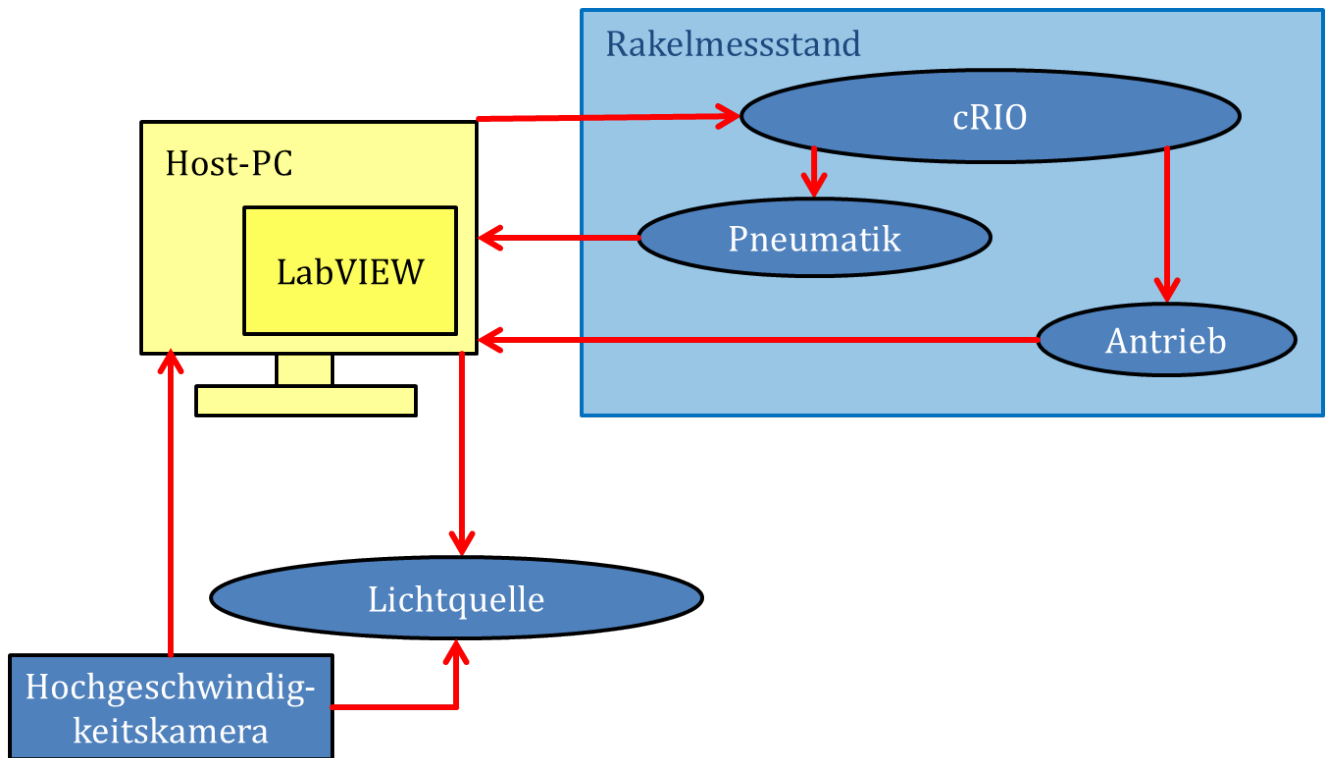
---

Abbildung 28 zeigt schematisch die Funktionsweise des gesamten experimentellen Aufbaus und wie die zuvor beschriebenen Komponenten verbunden sind. Die roten Pfeile symbolisieren die Datenverbindungen der einzelnen Komponenten im gesamten Experimentaufbau.

Der Host-PC steuert den Mikrocontroller (cRIO), die Lichtquelle und die Hochgeschwindigkeitskamera über die jeweilige Steuerungssoftware. Der Host-PC steuert mit Hilfe von LabVIEW einen Mikrocontroller (cRIO), der wiederum die Pneumatikzylinder und den Antrieb (Motor) ansteuert. Am Pneumatikzylinder wird die Rakelanpresskraft als Feedbacksignal an den Host-PC zurück gegeben. Der Motor gibt ebenso ein Signal proportional zum aktuellen Drehmoment an den Host-PC zurück. Somit kann der Rakelprozess überwacht werden, da bei einem kontinuierlichen, stabilen Rakelprozess beide Signale nicht stark schwanken sollten.

Am Host-PC kann die Bildaufnahme rate der Hochgeschwindigkeitskamera eingestellt werden und ein Triggermodus verwendet werden, der es erlaubt, dass die Hochgeschwindigkeitskamera bei jeder Bildaufnahme ein Triggersignal aussendet. Über ein Koaxialkabel werden die Triggersignale an die Steuerungseinheit der Lichtquelle gesendet, sodass die Lichtquelle in der selben Frequenz wie die Bildaufnahme rate der Hochgeschwindigkeitskamera Lichtpulse emittiert. Bei der verwendeten Lichtquelle (siehe Abschnitt 3.2.1) war dieses Vorgehen notwendig, da über eine gepulste Lichtquelle die notwendigen Lichtintensitäten bei hoher Bildaufnahme rate erzeugt werden können. Der Host-PC kann die Lichtquelle ebenfalls ansteuern, sodass auch von der Hochgeschwindigkeitskamera unabhängige Triggersignale an die Lichtquelle gesendet werden. Die Hochgeschwindigkeitskamera speichert die Bilddaten während der Aufnahme auf dem internen Speicher und diese können dann via Ethernet-Schnittstelle auf den Host-PC übertragen werden.

Die Art und Weise wie der gesamte Experimentaufbau realisiert wurde, hat den Vorteil, dass die verwendeten Komponenten leicht ersetzt oder durch zusätzliche Komponenten erweitert werden können. Es ließen sich an das bestehende System zusätzliche Kameras, Beleuchtungseinrichtungen usw. anbringen, ohne dass das bestehende System stark verändert werden würde. Da die Durchführbarkeit einiger Experimente zunächst getestet werden musste, hat sich der modulare Experimentaufbau bewährt. Außerdem hat die modulare Vorgehensweise den Vorteil, dass die einzelnen elektronischen Komponenten sich nicht gegenseitig beeinflussen können, was die Störanfälligkeit verringert.



**Abbildung 28:** Funktions-Skizze des gesamten experimentellen Aufbaus aus Rakelmessstand, Host-PC, Lichtquelle und Hochgeschwindigkeitskamera. Rote Pfeile zeigen wie die Komponenten in ihrer Datenübermittlung verbunden sind.

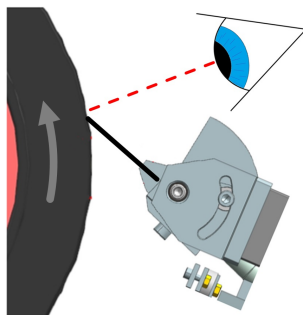
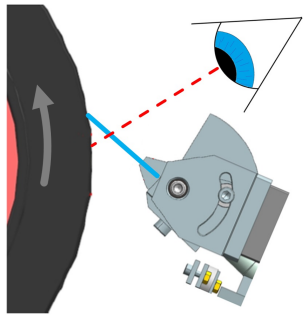
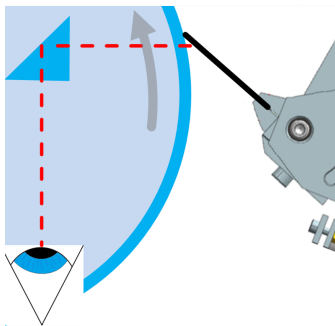
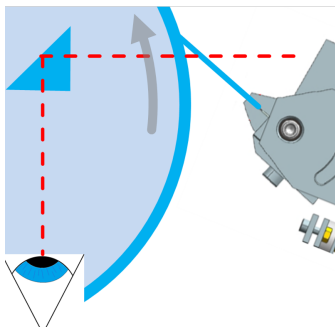
### 3.3.1 Mögliche Experimentanordnungen und -kategorien

Mit dem zuvor beschriebenen Rakelmessstand sind unterschiedliche Experimentanordnungen für verschiedene Zwecke möglich. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Experimentkategorien von Experimentanordnungen definiert, die mit dem Rakelmessstand und einem transparenten Hohlzylinder realisierbar sind. In Tabelle 8 sind Experimentanordnungen aufgeführt, die in den durchgeführten Experimenten verwendet wurden. Das eingezeichnete Auge steht symbolisch für die Perspektive aus der die Kamera auf das zu untersuchende Objekt gerichtet ist. Die Positionierung der verwendeten Lichtquelle wurde ausgelassen, da dies im jeweiligen Experiment von der verwendeten Lichtquelle, Optik und der Beschaffenheit und Fokus des zu untersuchenden Objektes ist.

Neben den genannten, sind noch weitere Experimentanordnungen möglich. Da diese allerdings in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet wurden, werden im Folgenden nur einige wenige Beispiele genannt, auf die im späteren Ausblick noch einmal eingegangen wird. In Tabelle 8 ist beispielsweise die seitliche Beobachtungsperspektive symbolisch dargestellt. Der Rakelmessstand bietet einen freien Blick auf den Fluidmeniskus unter der Rakel. Weiter wurde eine Messmethode an Experimentanordnung **T2** getestet, bei der die Lichtquelle in der Skizze berücksichtigt wurde. Der Grund dafür liegt darin, dass es sich um eine besondere Art von Mess-

methode handelt, die im Abschnitt 4.6 auf Seite 98 als *Dunkelfeldmethode* bezeichnet und näher erläutert wird.

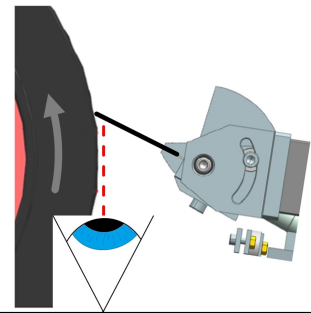
**Tabelle 8:** Übersicht über die in der Durchführung verwendete Experimentanordnungen und ihre Einteilung in Experimentkategorien

Experimentkategorie und Beschreibung	Skizze
<p><b>M1:</b> Die Hochgeschwindigkeitskamera und der Rakelmessstand werden wie in Abbildung 27 dargestellt, positioniert. Als Druckform wird ein graviertes Sleeve verwendet. Als Rakel werden konventionelle Rakel aus Edelstahl verwendet. Diese Anordnung eignet sich zur Betrachtung des Bereichs der Druckform, der direkt ausgerakelt wurde. Es kann ebenfalls die Rakelrückseite beobachtet werden. Zu sehen in Abbildung 25</p>	
<p><b>T1:</b> Die Hochgeschwindigkeitskamera und der Rakelmessstand werden wie in Abbildung 27 dargestellt, positioniert. Als Druckform wird ein graviertes Sleeve verwendet. Es wird eine transparente Rakel in einem Strip-Blade-Halter verwendet, sodass der Fluidmeniskus unter der Rakel durch die Rakel hindurch beobachtet werden kann.</p>	
<p><b>P1:</b> Bei dieser Experimentanordnung befindet sich die Hochgeschwindigkeitskamera seitlich neben dem Rakelmessstand. Des Weiteren wird ein transparenter Hohlzylinder als Druckformzylinder und ein optisches Prisma als Umlenkoptik verwendet. Als Rakel wird eine konventionelle Rakel verwendet. Der optische Strahlengang verläuft durch ein Umlenkprisma und durch den Mantel des transparenten Hohlzylinders. Diese Experimentanordnung ermöglicht Beobachtungen aus der Perspektive der Zylinderachse.</p>	
<p><b>P2:</b> Die Hochgeschwindigkeitskamera befindet sich seitlich neben dem Rakelmessstand und es werden transparenter Hohlzylinder und eine transparente Rakel verwendet. Der optische Strahlengang wird durch ein Umlenkprisma aus dem Zylinderinneren durch den transparenten Zylindermantel, Fluidmeniskus und transparente Rakel geführt.</p>	

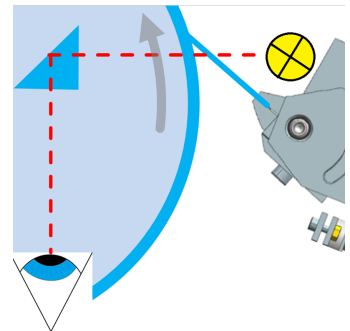
---

**Experimentkategorie und Beschreibung****Skizze**

**M2:** Verwendet werden graviertes Sleeve und eine konventionelle Rakel. Die Hochgeschwindigkeitskamera wird seitlich neben dem Rakelmessstand positioniert. Diese Anordnung ermöglicht den Blick auf die Rakel und die Druckform von der Seite.



**T2:** Die Kamera befindet sich seitlich neben dem Rakelmessstand, der optische Strahlengang verläuft durch das optische Prisma, durch den Mantel des transparenten Hohlzylinders und schließlich durch eine transparente Rakel. Die Lichtquelle befindet sich im Strahlengang befindet, sodass die Anordnung einem Durchlichtverfahren gleich kommt.



---

### 3.4 Durchführung der Experimente

---

Im Folgenden Abschnitt werden verschiedene Experimente und ihre Durchführung mit den zuvor erwähnten Methoden beschrieben. Für die in den Abschnitten 3.1.1, 3.2 und 3.3.1 beschriebenen Werkzeugen und Methoden und ihrer Kombination (Abschnitt 3.3) wurden Experimente entwickelt und durchgeführt, die den Einfluss der immer wieder auftauchenden Haupteinflussgrößen des Rakelprozesses identifizieren und quantifizieren sollen. Hierzu gehören:

- Einfluss der Rakelanpresskraft
- Einfluss der Fluidviskosität
- Einfluss der Gravur
- Einfluss der Kapillarzahl

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, wird eine Druckform mit zwei unterschiedlichen Gravurparametern verwendet. Als Rakelwinkel  $\theta$  wurde in allen Experimenten ein Winkel von  $65^\circ$  eingestellt. Als Rakelanpresskraft wurden für die Experimente eine Linienanpresskraft von 0,25 N/mm verwendet. Die Auswahl dieser Parameter erfolgte in Anlehnung an die in Abschnitt 2.4 vorgestellten Untersuchungen und an Erfahrungswerten aus dem Tiefdruck.

---

In einigen Experimenten und Experimentanordnungen wurde eine transparente Rakel verwendet, um einen optischen Einblick auf den Bereich zwischen der Rakel und der Druckform zu gewinnen. Hierzu wurde eine 250  $\mu\text{m}$  starke Folie aus *Polyethylennaphtalat* (PEN) in eine sogenannte Strip-Blade-Halterung eingespannt. Die Strip-Blade-Halterung lässt sich wie eine konventionelle Standardrakel in den Rakelhalter einbauen. Da die Rakel aus PEN-Folie eine deutlich niedrigere Biegesteifigkeit und Materialhärte aufweist, als eine Lamellenrakel aus Stahl, mussten für die Experimente mit einer transparenten Rakel die Rakelanpresskraft entsprechend angepasst werden um ein vergleichbares Rakelverhalten zu gewährleisten. Für die Experimente mit der konventionellen Stahl-Rakel konnten Linienanpresskraft und Rakelwinkel immer gleich gewählt werden. Unter Verwendung von eingeschliffenen Rakelmessern, ließen sich in jedem Experiment gleiche Experimentbedingungen herstellen. Für die Experimente mit der transparenten Rakel gilt das nicht. Dort wurden die Rakelanpresskräfte so gewählt, dass die Durchbiegung der Rakel nach dem Anstellen sehr klein war. In den Abschnitten 3.4.2 und 4.1 wurde der Einfluss der Rakelanpresskraft auf die Durchbiegung der Rakel, sowie der Einfluss auf den Rakelprozess untersucht.

---

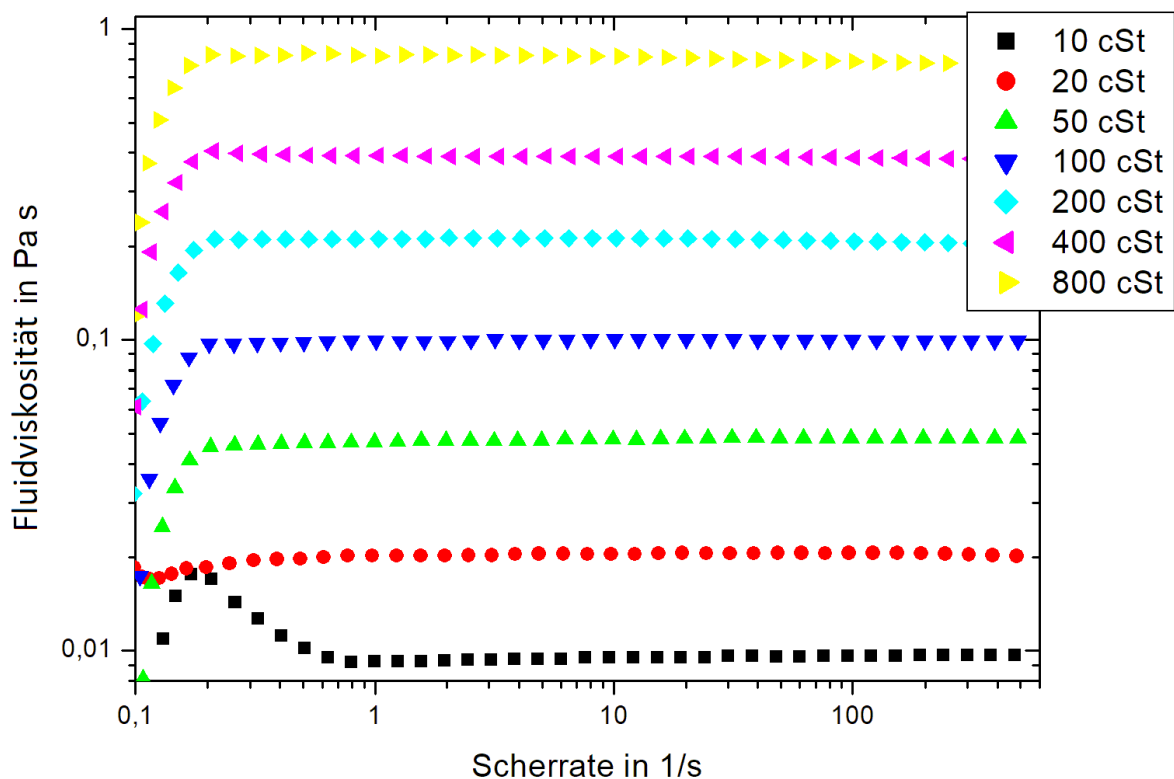
#### 3.4.1 Bestimmung der dynamischen Viskosität der verwendeten Fluide

---

In fast allen Experimenten wurden Silikonöle der Serie Elbesil Öl B verwendet, welche von der Firma QUAX beschafft wurden. Silikonöle besitzen den Vorteil, dass sie bei sachgemäßer Anwendung weder volatil noch toxisch, sowie unter Normalbedingungen chemisch weitestgehend stabil sind. Außerdem werden sie verwendet, da sie nahezu newtonsches Verhalten unter Scherung zeigen. In einigen Experimenten wurden Wasser-Glycerin-Mischungen verwendet. Wasser-Glycerin-Mischungen besitzen den Vorteil, dass sich hier sämtliche Viskositäten zwischen 1 mPas und  $\approx 1400$  mPas über ihr Mischungsverhältnis einstellen lassen. Allerdings verändern sich die Mischungsverhältnisse auf Grund hygroskopischer und volatiler Eigenschaften des Gemisches mit der Zeit unter normalen Laborbedingungen. Da die Silikonöle nicht während der gesamten Versuchszeit zur Verfügung standen, wurde ersatzweise auf Glycerin-Wasser-Gemische ausgewichen. Allerdings wurde innerhalb einer Experimentreihe die beiden Fluidgruppen konsistent verwendet, also nicht innerhalb eines Experiments das Fluid variiert. Die dynamischen Viskositäten wurden mit einem Rotationsrheometer Kinexus Lab+ des Geräteherstellers Malvern bestimmt. Hierfür wurde eine Kegel-Platte-Anordnung verwendet (Kegeldurchmesser = 60 mm; Kegelspitzenwinkel =  $1^\circ$ ; Temperatur 23  $^\circ\text{C}$ ). Die dynamischen Viskositäten einiger der verwendeten Silikonöle sind in Abbildung 29 dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die verwendeten Öle in einem Scherratenbereich über mehrere Größenordnungen newtonsches Verhalten zeigen. Bei Scherraten im niedrigen Bereich ( $0,2 \text{ s}^{-1}$  -  $0,3 \text{ s}^{-1}$ ) scheinen sich die Öle nicht-newtonsch zu verhalten. Dies ist auf die Messungenauigkeiten des Messinstrumentes



zurückzuführen, da im niedrigen Scherratenbereich die Scherspannungen so niedrig sind, dass sie schwer zu bestimmen sind. Da sämtliche Experimente bei Raumtemperatur durchgeführt wurden, wurden keine temperaturabhängigen Untersuchungen durchgeführt. Die Oberflächenspannungen unterscheiden sich bei den verwendeten Silikonölen kaum und befinden sich in einem Bereich von  $(20 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ . (vgl. Abschnitt A.2.1) In Abbildung 29 wurde die vertikale Achse mit der Einheit *mPas* skaliert, die jeweiligen Öle aber mit der Einheit *cSt* benannt. Der Grund dafür ist, dass unter Standardbedingungen  $1 \text{ cSt} \approx 1 \text{ mPas}$ .



**Abbildung 29:** Oben: Fotografie der verwendeten Silikonöle  
Unten: Darstellung der Fluidviskositäten einiger der verwendeten Silikonöle in Abhängigkeit von der Scherrate. Versuchsparameter nach Tabelle 9

**Tabelle 9:** Versuchsparameter zur Bestimmung der Fluidviskosität

Messgerät	Rheometer (Malvern Kinexus Lab+)
Fluid	Silikonöl (Datenblatt in A.2.1)
Fluidviskosität	(10 - 800) mPas
Scherrate	(0,1 - 1000) s <sup>-1</sup>
Kegelwinkel	1°
Temperatur	23 °C



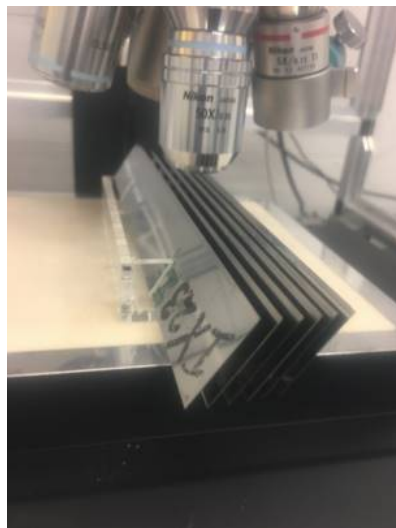
---

### 3.4.2 Einfluss der Rakelanpresskraft

---

In Kapitel 2.1.4 wurde der effektive Rakelwinkel definiert. Es wurde beschrieben wie die Rakelanpresskraft Einfluss auf die Ausbildung der Kontaktzone auf Grund der mechanischen Randbedingungen hat. Es wurde auch beschrieben, ob und wie sich die Rakelanpresskraft auf den Rakelprozess auswirkt. Zur experimentellen Untersuchung wurde der Einschleifvorgang zu Beginn des Rakelprozesses im Tiefdruck als Fokus der Beobachtung gewählt. Für dieses Experiment wurde eine Labortiefdruckmaschine (Superproofer 220) des Herstellers GT+W verwendet. Der Vorteil dieser Maschine bestand darin, dass eine Tiefdruckform mit 64 Feldern (Fläche:  $1 \times 1 \frac{\text{cm}^2}{\text{Feld}}$ ) mit jeweils unterschiedlichen Gravurparametern verwendet werden konnte. Auf diese Weise wurde der Gravurparameter als maßgeblicher Faktor ausgeschlossen, da viele Gravuren auf den Prozess gleichermaßen Einfluss nehmen und sich ein zeitlicher Mittelungseffekt einstellen konnte. Für das Experiment wurden Rakel der Fa. Daetwyler benutzt. Als Fluid wurde eine Mischung aus Glycerin und Wasser mit einer Viskosität von 1000 mPas verwendet. Es wurden verschiedene Rakel gleichen Typs (Edelstahl-Lamellenrakel wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben) in den Rakelhalter eingespannt und der Rakelprozess wurde unter jeweils verschiedenen verschiedenen Rakelanpresskräften durchgeführt. Nach einer Rakeldauer von 45 Minuten wurde die Kontaktzone der Rakel profilometrisch untersucht.

Hierzu wurden die Rakel unter definiertem Winkel von  $48^\circ$  unter einem Profilometer (Sensofar PLu Neox) so positioniert, dass der die Rakelfase optisch erfasst und der effektive Rakelwinkel bestimmt werden konnte. (vgl. Abbildung 30)



**Abbildung 30:** Die Rakel wurden in einer Halterung unter einem Winkel von  $48^\circ$  profilometrisch untersucht um den effektiven Rakelwinkel zu bestimmen

**Tabelle 10:** Versuchsparameter zur Bestimmung des Einflusses der Rakelanpresskraft

Versuchsplattform	Labortiefdruckmaschine (GT+W Superproofer 220)
Fluid	Glycerin
Fluidviskosität	$\approx 1400 \text{ mPas}$
Rakelanpresskraft	$(0,25 - 1,5) \text{ N mm}^{-1}$
Rakelgeschwindigkeit	$4 \text{ ms}^{-1}$
Rakelwinkel	$65^\circ$
Rakeldauer	45 min

### 3.4.3 Einfluss der Fluidviskosität auf den Rakelprozess

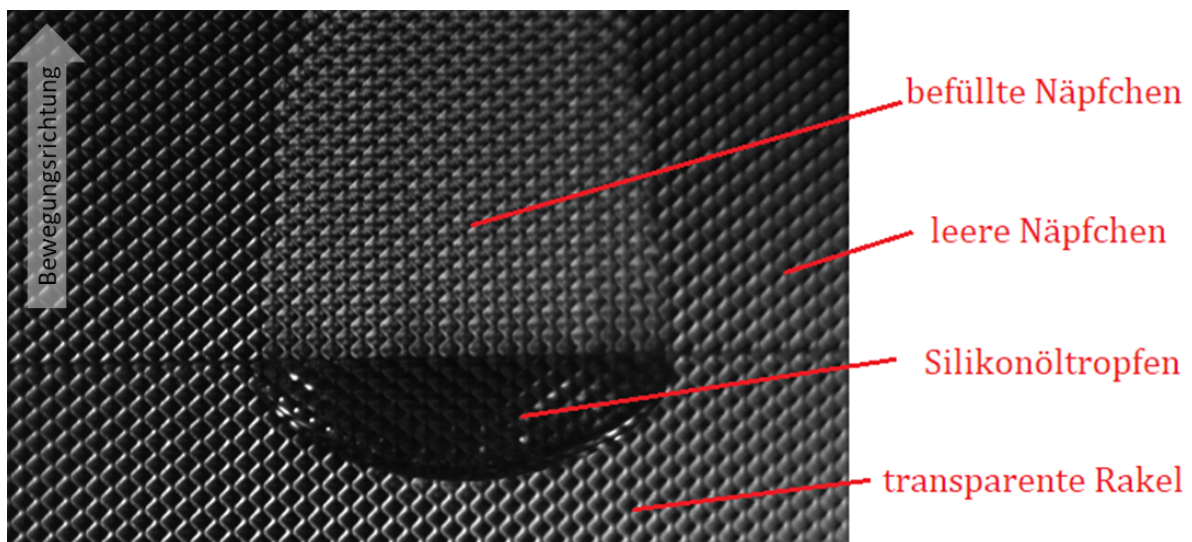
Zur Untersuchung des Einflusses der Fluidviskosität wird eine weitere Experimentanordnung verwendet. Hierbei wird die Experimentanordnung **M1** verwendet. Als Rakel wird eine konventionelle Edelstahl-Lamellenrakel der Fa. Daetwyler (vgl. Abschnitt 3.1.2) verwendet. Anschließend werden Silikonöltropfen (Volumen =  $2 \mu\text{l}$ ) mit unterschiedlichen Viskositäten auf die Druckform gegeben und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten abgerakelt. Die Tropfen werden dabei von der Rakel kontinuierlich geschert, verbreitert/verteilt und hinterlässt einen Schmierfilm auf der Druckformoberfläche, der mit den passenden optischen Randbedingungen (z.B. Positionierung der Kamera und der Lichtquelle) zu erkennen ist. Es wird untersucht, ob und welchen Einfluss die Viskosität des verwendeten Fluids auf die Verteilung des Fluids auf der Druckformoberfläche hat. Um den Einfluss der Gravurparameter auszuschließen, wird auf glatten und ungravierten Druckformen abgerakelt. Die dazugehörigen Versuchsparameter sind in Tabelle 11 aufgelistet.

**Tabelle 11:** Versuchsparameter zur Bestimmung des Einflusses der Fluidviskosität

Versuchsplattform	Rakelmessstand
Fluid	Silikonöl
Fluidviskosität	$(10 - 800) \text{ mPas}$
Rakelanpresskraft	$0,25 \text{ N mm}^{-1}$
Rakelgeschwindigkeit	$(0,115; 0,23) \text{ ms}^{-1}$
Rakelwinkel	$65^\circ$
Experimentkategorie	<b>M1</b>

### 3.4.4 Einfluss der Tiefdruck-Gravur auf den Rakelprozess

In diesem Experiment wird der Einfluss der Tiefdruck-Gravur auf den Rakelprozess untersucht. Zur Untersuchung des Einflusses der Gravurparameter einer Druckform auf das Benetzungsverhalten wird ein weiterer Satz an Experimentparametern variiert. Ein ähnliches Experiment wurde auf den gravierten Bereichen der Druckform durchgeführt, um den Einfluss der Gravur auf die Verteilung von Silikonöltropfen unter der Rakel zu beobachten. Hierzu wurde die Experimentkategorie **M1** verwendet, um die Tropfenverbreiterung zu beobachten. Die Rakelgeschwindigkeit betrug  $0,23 \text{ ms}^{-1}$ . Der wesentliche Unterschied beider Systeme besteht darin, dass in Abschnitt 3.4.3 der Silikonöl-Tropfen nur Volumen auf Grund des Schmierfilms hinter der Rakel verliert. Wird in einem gravierten Bereich gerakelt, so ist zu erwarten, dass sich die Nöpfchen ganz oder teilweise füllen. In Abbildung 31 ist gut zu erkennen, dass sich Silikonöl in den Nöpfchen der gravierten Bereiche befindet, da das Licht an der Oberfläche des Silikonöls reflektiert wird. Zu sehen ist ein Silikonöltropfen, der von einer transparenten Rakel auf einer gravierten Druckform (Tonwert 80 %) abgerakelt wird. Der Tropfen erscheint sehr dunkel, da das einfallende Licht durch den Tropfen so gebrochen wird, dass kaum Licht in die Kamera fallen kann. Das Licht wird an den Stegen der Druckform reflektiert, und die Gravur ist deutlich zu erkennen. Der horizontale schwarze Balken ist die Rakelfase. In den Aufnahmen bewegt sich die Druckform vertikal von unten nach oben und die Rakel und der Silikonöltropfen verbleiben an der Stelle. So lässt sich beobachten, wie die transparente Rakel den Tropfen auf der Druckform verteilt und es ist ein deutlicher Schmierfilm hinter der Rakel zu erkennen.



**Abbildung 31:** Silikonöltropfen wird auf einer gravierten Druckform abgerakelt und befüllt die Nöpfchen. Experimentparameter nach Tabelle 12

Um den Einfluss der Gravurparameter zu untersuchen wurden Silikonöl-Tröpfchen mit einem Volumen von  $2\ \mu\text{l}$  auf zwei unterschiedlich gravierten Bereichen abgerakelt. Die Gravuren unterschieden sich nur auf Grund des Tonwerts. Die gravierten Näpfchen haben einen Abstand von  $25\ \mu\text{m}$ . In Abbildung 23 sind Aufnahmen der jeweiligen Näpfchen zu sehen.

**Tabelle 12:** Experimentparameter zur Bestimmung des Einfluss der Gravur

Versuchsplattform	Rakelmessstand
Fluid	Silikonöl (Datenblatt in A.2.1)
Fluidviskosität	(100; 200; 400; 800) mPas
Rakelgeschwindigkeit	$0,23\ \text{ms}^{-1}$
Tonwert	80 %, 100 %
Experimentkategorie	<b>M1</b>

### 3.4.5 Einfluss der Kapillarzahl auf den Rakelprozess

Zur Untersuchung des Einflusses der Kapillarzahl auf das Benetzungsverhalten im Rakelprozess werden zwei verschiedene Experimente durchgeführt, bei denen die Fluidviskosität, als auch die Rakelgeschwindigkeit variiert werden. In Abschnitt 2 wurde die Kapillarzahl beschrieben, die in der Literatur als dimensionslose Einflussgröße zur Vorhersage des Rakelprozesses verwendet wird. In diesem Experiment sollte nicht nur der Einfluss der Kapillarzahl auf den Rakelprozess untersucht werden. Es soll auch untersucht werden, ob unterschiedliche Produkte aus Rakelgeschwindigkeit und Fluidviskosität, welche die gleiche Kapillarzahl ergeben, den Rakelprozess beeinflussen. In Kapitel 3.1.1 wurde beschrieben, dass Rakelmesser unterschiedlicher Materialien in dem entwickelten Rakelhalter verwendet werden können. In dem hier beschriebenen Experiment wurde eine  $250\ \mu\text{m}$  starke PEN-Folie als transparente Rakel verwendet um zwei unterschiedliche Rakelprozesse mit gleicher Kapillarzahl beobachten zu können. Die transparente Rakel hatte eine Breite von  $1,5\ \text{cm}$ . In Tabelle 13 sind die aus verschiedenen Rakelgeschwindigkeiten und Fluidviskosität berechneten Kapillarzahlen, ausgehend von einer Oberflächenspannung des Fluids von  $\sigma \approx 20\ \text{mN/m}$ , die der Hersteller für die verwendeten Öle angibt (siehe Abschnitt 3.4.1). Die gelb und grün markierten Zellen stehen für paarweise gleiche Kapillarzahlen, die durch unterschiedliche Kombinationen von Rakelgeschwindigkeit und Fluidviskosität zustande kommen.

**Tabelle 13:** Die Matrix zeigt die aus Gleichung 19 berechneten Kapillarzahlen

Viskosität in mPas	10	20	50	100	200	400	800
Rakelgeschwindigkeit $v$ in $\text{ms}^{-1}$							
0,0576	0,029	0,0576	0,144	0,288	0,576	1,52	2,304
0,115	0,0576	0,115	0,288	0,576	1,152	2,304	4,608
0,23	0,115	0,23	0,576	1,152	2,304	4,608	9,216
0,461	0,23	0,461	1,152	2,304	4,608	9,216	18,432

Der Experimentaufbau bestand aus dem Rakelmessstand, einer gravierten Tiefdruckform und der Hochgeschwindigkeitskamera. Als Tiefdruckform wurde ein Sleeve verwendet. In Abbildung 23 auf Seite 48 sind profilometrische Aufnahmen der Nöpfchen zu sehen. Auf Grund der niedrigeren Steifigkeit im Vergleich zu einer metallischen Rakel, musste die Rakelanpresskraft bei der transparenten Rakel entsprechend niedriger gewählt werden. Der Experimentaufbau entsprach der Experimentanordnung der Experimentkategorie **T1**. Die transparente Rakel wurde unter einem Rakelwinkel von  $65^\circ$  an den Druckformzylinder angestellt. Der optische Strahlengang verlief durch die transparente Rakel hindurch, wurde an der Druckformoberfläche reflektiert und gestreut und schließlich wieder auf den Kamerasensor zurück geworfen. Die Kamera wurde mit einem Objektiv Canon EF 180 mm / 3,5 L USM Macro ausgestattet, da sich das Verhältnis aus Vergrößerung und Arbeitsabstand als praktikabel erwiesen hat. Die Bildaufnahmerate betrug 3000 fps. Die Beleuchtung wurde so positioniert, dass die Oberfläche des Sleeves im Fokus der Kamera als Reflektor diente. Somit entstand zwischen der reflektierenden Oberfläche des Sleeve und Fluid auf der Druckform ein Kontrast. Die verwendeten Silikonöle besitzen einen optischen Brechungsindex  $> 1$ , weshalb sie den Strahlenverlauf des Lichtes so verändern, dass die Tropfenkonturen auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen als Kontrastunterschied zu erkennen sind. Somit ist der maximale Kontrast in den aufgenommenen Bildern gewährleistet. Der gesamte Experimentanordnung entspricht etwa dem Aufbau wie er in Abbildung 27 dargestellt ist.

Für das Experiment wurden Silikonöle mit verschiedenen Viskositäten verwendet um jeweils das Benetzungsverhalten bei drei unterschiedlichen Kapillarzahlen zu beobachten. In Tabelle 14 sind diese farblich markiert dargestellt. Die unterschiedlichen Kapillarzahlen werden durch verschiedene Rakelgeschwindigkeiten erzeugt. Mit einer Eppendorfpipette wurden Silikonöltropfen mit einem Volumen von  $2 \mu\text{l}$  auf die Druckform gegeben. Mit der Hochgeschwindigkeitskamera wurde durch die transparente Rakel hindurch die Tropfenverteilung unter der transparenten Rakel aufgenommen. Zwischen den Experimenten wurde die Druckform mit or-

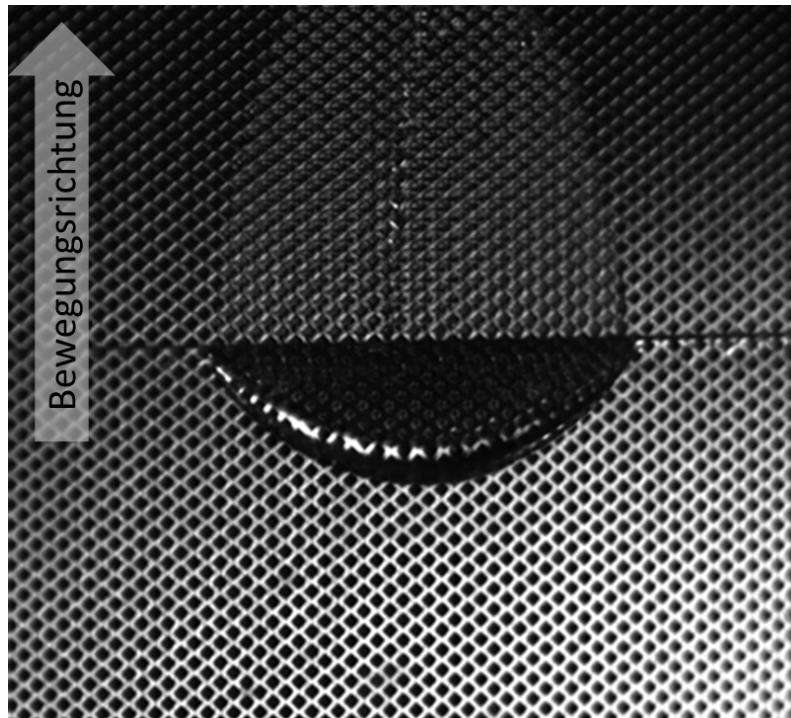
ganischen Lösemitteln gereinigt, um eine Beeinflussung des Tropfenverhaltens auf Grund von Silikonölresten auf der Druckformoberfläche auszuschließen.

**Tabelle 14:** Die Matrix zeigt die aus Gleichung 19 berechneten Kapillarzahlen. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Viskosität in mPas	10	20	50	100	200	400	800
Rakelgeschwindigkeit $v$ in $\text{ms}^{-1}$							
0,0576	0,029	0,0576	0,144	0,288	0,576	1,52	2,304
0,115	0,0576	0,115	0,288	0,576	1,152	2,304	4,608
0,23	0,115	0,23	0,576	1,152	2,304	4,608	9,216
0,461	0,23	0,461	1,152	2,304	4,608	9,216	18,432

Abbildung 32 zeigt exemplarisch einen Tropfen Silikonöl, der auf der gravierten Fläche der verwendeten Druckform mit einer Gravur von Tonwert 80 % abgerakelt wurde. Die Bewegungsrichtung der Druckform verläuft in der Aufnahme vertikal nach oben. Die horizontale dunkle Linie in Bildmitte ist die Rakelfase. Unterhalb der Rakelfase ist der Fluidtropfen zu erkennen, der auf Grund der mechanischen Zwangsbedingungen sich unter der Rakel auf der Druckform verteilt. Oberhalb der Rakelfase ist der Schmierfilm hinter der Rakel nach dem Rakeln zu erkennen. Im Hintergrund der Abbildung ist das gravierte Feld mit den Näpfchen als dunkle Rasterpunkte zu erkennen.





**Abbildung 32:** Ansicht durch eine transparente Rakel, die einen Tropfen aus Silikonöl auf einer Druckform abrakelt. Versuchsparameter nach Tabelle 15

**Tabelle 15:** Versuchsparameter zur Bestimmung des Einfluss der Kapillarzahl

Versuchsplattform	Rakelmessstand
Fluid	Silikonöl (Datenblatt in A.2.1)
Fluidviskosität	(100; 200; 400; 800) mPas
Rakelgeschwindigkeit	(0,0576; 0,115; 0,23) ms <sup>-1</sup>
Rakelbreite	1,5 cm
Tonwert	80 %
Rakelwinkel	65°
Experimentkategorie	<b>T1</b>

---

### 3.4.6 Übersicht der Experimente

---

Dieser Abschnitt soll eine Übersicht der Experimente liefern. In Tabelle 16 sind die durchgeführten Experimente aufgeführt. Jede Zeile der Tabelle steht für ein Experiment. In der ersten Spalte sind die Bezeichnungen des jeweiligen Experiments, der Abschnitt und Seitenzahl, in welchem das Experiment beschrieben wird, aufgeführt. Die zweite Spalte informiert über das Ziel des jeweiligen Experiments. Die dritte Spalte beschreibt, welche Parameter im Experiment variiert wurden. Die vierte Spalte gibt jeweils an, in welcher Experimentkategorie (**EK**) aus Abschnitt 3.3.1 das Experiment durchgeführt wurde. Die letzte Spalte gibt die Gesamtzahl (**Anz.**) der Experimente an, also wie oft das Experiment mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt wurde. In Tabelle 16 sind nur die Experimente aufgeführt, die auch quantitativ ausgewertet wurden.

In Abschnitt 4 werden die Beobachtungen und Ergebnisse der durchgeführten Experimente präsentiert und anschließend diskutiert. Außerdem wurden qualitative Beobachtungen gesammelt und dokumentiert. Am Ende dieser Arbeit (Kapitel 5) wird die gesamte Vorgehensweise abschließend bewertet.



**Tabelle 16:** Übersicht der durchgeführten Experimente

Experiment (Abschnitt) Seite	Ziel des Experiments	Variierte Parameter	EK	Anz.
Bestimmung der dyn. Vis- kosität (3.4.1) S. 58	Bestimmung der Fluidvisko- sität der verwendeten Fluide und Überprüfung auf new- tonsches Verhalten	Scherrate = $(0,1 - 1000) \text{ s}^{-1}$  versch. Silikonöle	-	8
Einfluss der Rakelanpress- kraft (3.4.2) S. 61	Untersuchung des Einflusses auf die Ausbildung der Kon- taktzone und des effektiven Rakelwinkels bei einer Ra- keldauer von 45 Minuten	Rakelanpresskraft = $(0,25; 0,5;$ $0,75; 1; 1,25; 1,5) \text{ N mm}^{-1}$	-	6
Einfluss der Fluidviskosi- tät (3.4.3) S. 62	Untersuchung des Einflusses der dynamischen Viskosität auf die Verteilung unter der Rakel (Tropfenbreite) wäh- rend des Rakelprozesses als Funktion des Rakelwegs	Rakelgeschwindigkeit = $(0,115;$ $0,23) \text{ ms}^{-1}$  Fluidviskosität = $(10; 20;$ $50; 100; 200; 400; 800) \text{ mPas}$	<b>M1</b>	14
Einfluss der Tiefdruck- Gravur (3.4.4) S. 63	Untersuchung des Einflusses von Gravuren unterschiedli- cher Tonwerte auf die Vertei- lung unter der Rakel (Trop- fenbreite) während des Ra- kelprozesses als Funktion des Rakelwegs	Fluidviskosität = $(100; 200; 400;$ $800) \text{ mPas}$  Tonwert = $(80 \%; 100 \%)$	<b>M1</b>	8
Einfluss der Kapillarzahl (3.4.5) S. 64	Untersuchung des Einflusses für Rakelprozesse mit un- terschiedlichen Kapillarzah- len auf die Verteilung unter der Rakel (Tropfenbreite) als Funktion des Rakelwegs	Rakelgeschwindigkeit = $(0,029;$ $0,058; 0,115) \text{ ms}^{-1}$  Fluidviskosität = $(100; 200;$ $400; 800) \text{ mPas}$	<b>T1</b>	16
			$\Sigma=$	52

---

## 4 Auswertung und Ergebnisse

---

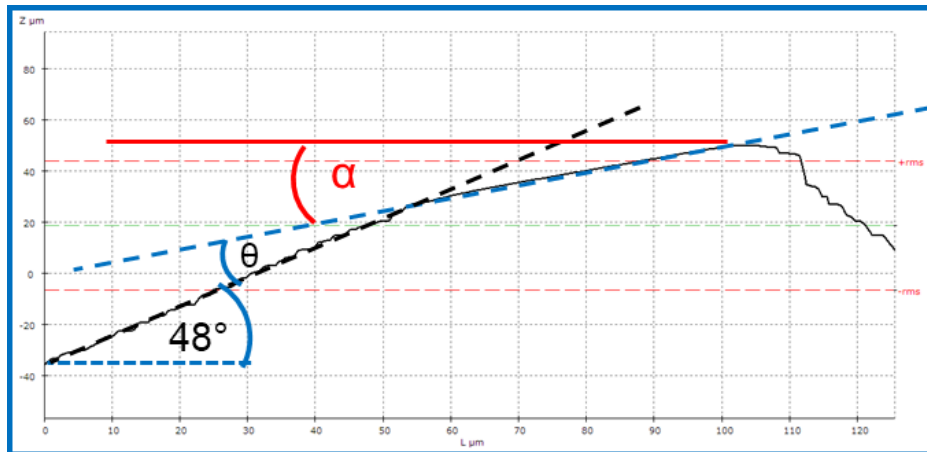
In den folgenden Abschnitten werden die in Kapitel 3 beschriebenen Experimente ausgewertet und die Ergebnisse und Beobachtungen präsentiert. Es wird zuerst der Einfluss der Rakelanpresskraft auf die Kontaktzone in Abschnitt 4.1 untersucht. In Abschnitt 4.2 wird die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und die dazugehörige Bildkalibration erläutert. Weiter sollen die Beobachtungen zum Drip-Off-Effekt in Abschnitt 4.4.1 präsentiert und diskutiert werden. In Abschnitt 4.3 wird der Einfluss der Fluidviskosität auf die Tropfenbreite unter der Rakel untersucht. Es werden die Ergebnisse und Beobachtungen zum Einfluss der Gravurparameter untersucht (vgl. Abschnitt 4.4). Die Kapillarzahl als Einflussgröße wurde bereits in Abschnitt 2 diskutiert und soll, im Vergleich mit den Vorhersagen der Literatur, in Abschnitt 4.5 überprüft werden.

---

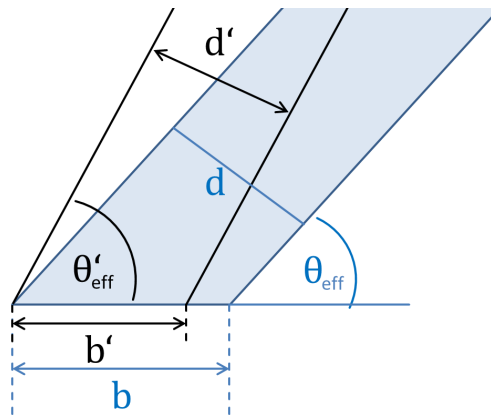
### 4.1 Einfluss der Rakelanpresskraft auf die Rakel

---

Es wurden mehrere Rakelklingen gleichen Typs mit unterschiedlichen Rakelanpresskräften unter ansonsten gleichen Bedingungen und gleicher Zeitdauer an den Tiefdruckzylinder angestellt um den Einfluss der Rakelanpresskraft auf den effektiven Rakelwinkel zu untersuchen. Wie bereits in Kapitel 3.4.2 beschrieben, wurde mit Hilfe der Rakelhalterung des Rakelmessstands unter einem Winkel von  $48^\circ$  profilometrisch untersucht. Abbildung 33 zeigt exemplarisch einen Profilschnitt einer bereits verwendeten Rakel. Im oberen Bereich ist die Kontaktzone zu sehen, die auf Grund des Verschleißes während des Rakelprozesses sehr glatt erscheint. Es wurden zusätzliche Hilfslinien und -winkel eingezeichnet. Die rote Linie ist eine horizontale Hilfslinie welche die Tangente der Kontaktzone (blau) schneidet. Zwischen der roten und blauen Linie wird der Winkel  $\alpha$  eingeschlossen. Mit der Information, unter welchem Winkel die Rakelmesser profilometrisch untersucht wurden (hier:  $48^\circ$ ), kann der effektive Rakelwinkel  $\theta_{eff}$  geometrisch bestimmt werden.



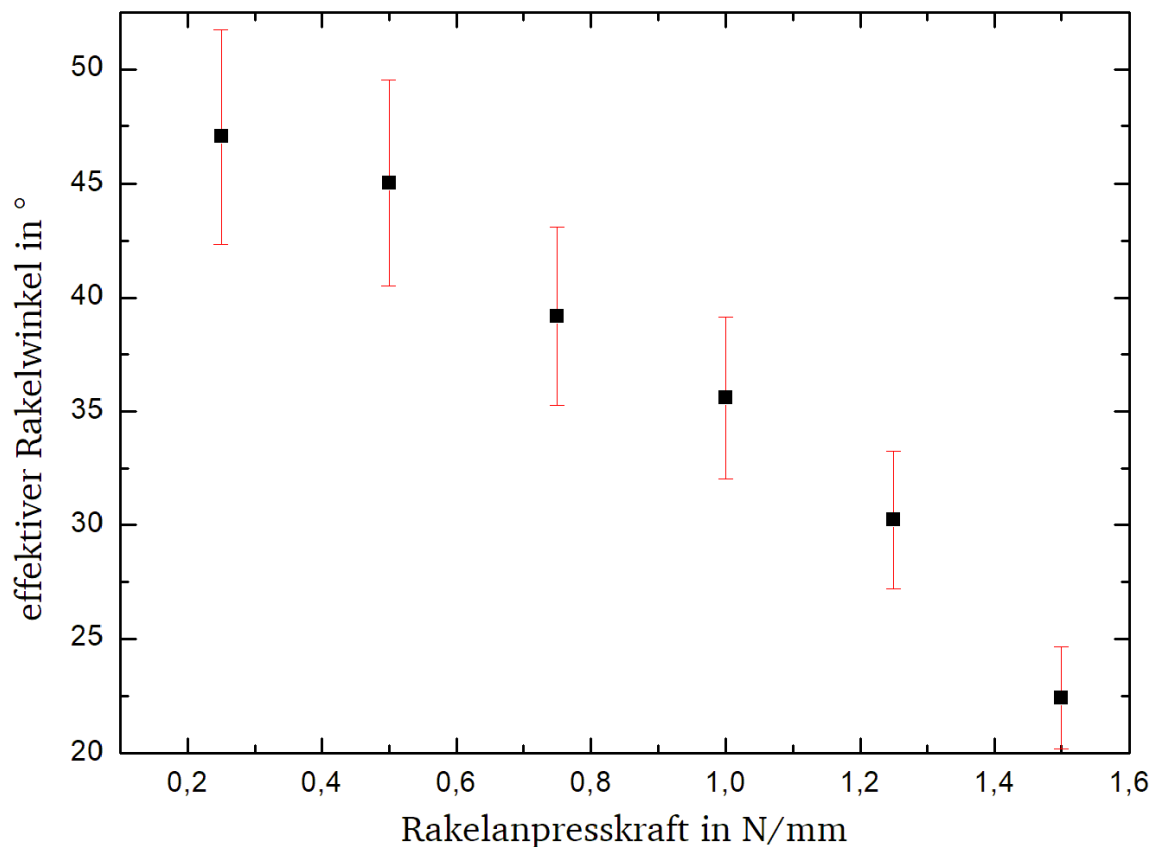
**Abbildung 33:** Mit dem Profilometer wird direkt der Winkel  $\alpha$  zwischen Kontaktzone (rot) und der Kontaktzone der Raketklinge (blau) bestimmt



**Abbildung 34:** Skizze einer Rakel mit zwei unterschiedlichen effektiven Rakelwinkeln  $\theta_{eff}$  und  $\theta'_{eff}$ , die zu unterschiedlichen Kontaktzonenbreiten bei selber Rakelstärke  $d = d'$  führen

Abbildung 34 zeigt schematisch, dass der effektive Rakelwinkel bei höherer Rakelanpresskraft spitzer (kleiner) wird. Dies ist durch die blauen Linien angedeutet. Daraus resultiert eine breitere Kontaktzone. Dies ist so zu erklären, dass die Rakel bei höherer Rakelanpresskraft stärker durchgebogen wird und die Rakel flacher an der Druckform anliegt (vgl. Jeon, Kim, Kim (2017)).

Abbildung 35 zeigt den Einfluss der Rakelanpresskraft auf den effektiven Rakelwinkel. Es wurde der effektive Rakelwinkel für 6 baugleiche Rakelmesser nach einer Rakeldauer von 45 Minuten bestimmt. Es ist zu erkennen, dass sich bei einer Rakelanpresskraft von 0,25 N/mm und einem Rakelwinkel von  $\theta = 65^\circ$  ein effektiver Rakelwinkel  $\theta_{1,eff} < 50^\circ$  einstellt. Bei einer Rakelanpresskraft von 1,5 N/mm hat sich ein effektiver Rakelwinkel  $\theta_{6,eff} < 25^\circ$  eingestellt.



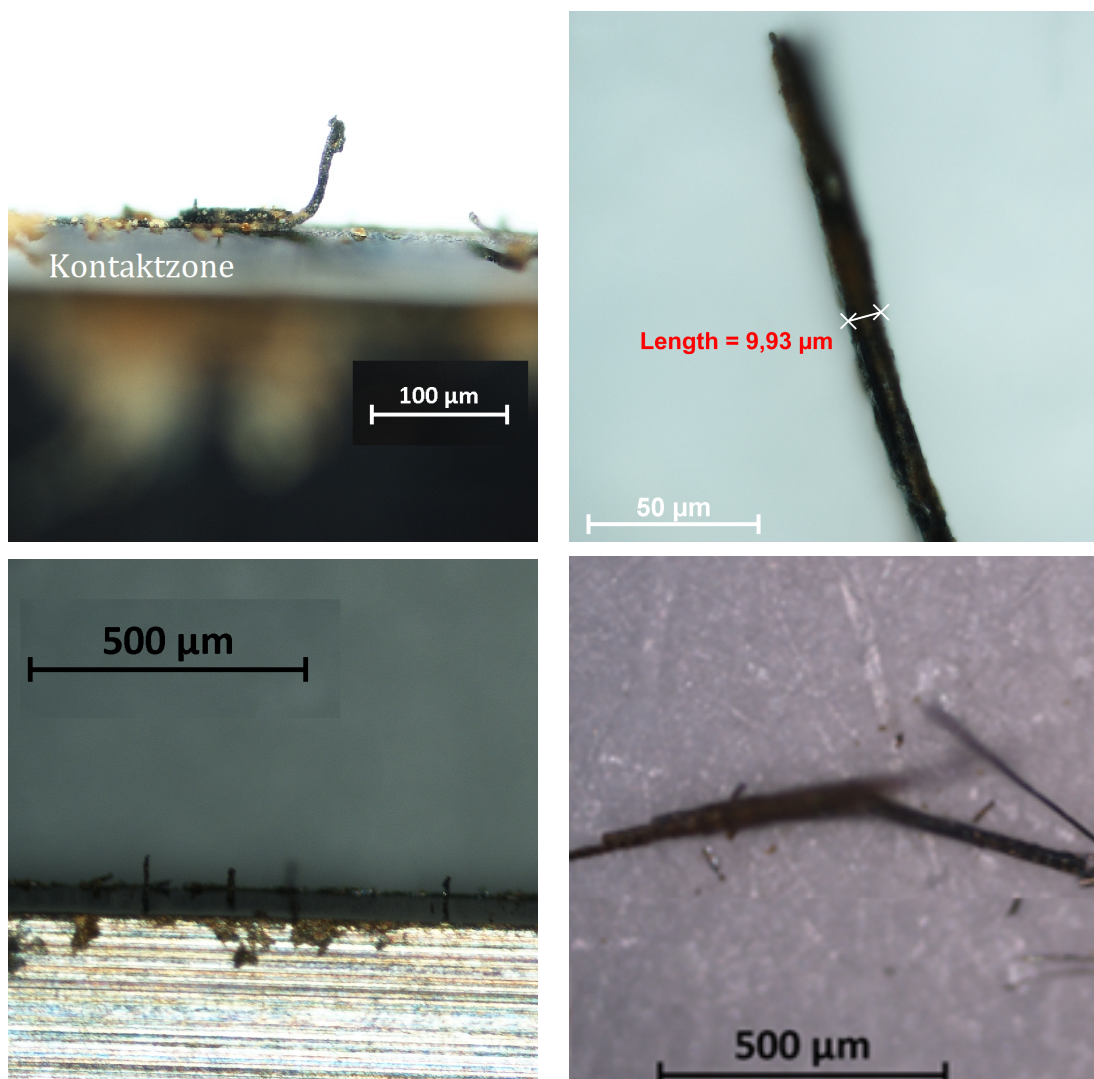
**Abbildung 35:** Veränderung des effektiven Rakelwinkels  $\theta_{eff}$  unter Veränderung der Rakelanpresskraft bei einem eingestellten Rakelwinkel  $\theta = 65^\circ$

Wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, wurde eine Labortiefdruckmaschine des Herstellers GT+W verwendet, da der Rakelmessstand zum Zeitpunkt der Durchführung nicht zur Verfügung stand. Das Experiment wurde bei einer Rakelgeschwindigkeit von  $4 \text{ ms}^{-1}$  und reinem Glycerin durchgeführt. Der effektive Rakelwinkel wurde für jede Rakel 5 mal bestimmt und der Mittelwert gebildet. Das Experiment wurde bei Rakelgeschwindigkeiten von  $2 \text{ ms}^{-1}$  und  $5 \text{ ms}^{-1}$  durchgeführt. Die Ergebnisse entsprechen dem Ergebnis aus Abbildung 35. Dies ist so zu erklären, dass sich die Rakelfase durch den Rakelprozess verändert, was als *Einschleifvorgang* bezeichnet wird. Sobald sich nach wenigen Minuten eine Kontaktzone ausgebildet hat, bleibt die Kontaktzone in ihrer Breite konstant. Lediglich die Lamellenbreite (siehe Abbildung 6 auf Seite 15) wird durch die Abriebseffekte kleiner und über die Geschwindigkeit dieses Vorgangs kann aus den Experimenten keine Aussage abgeleitet werden.

#### Ausbildung der Kontaktzone an der Rakel

Während des Rakelprozesses bildet sich an der Rakel im Laufe der Zeit eine Kontaktzone aus, die Rakelfase wird also mechanisch verformt. Bei der Untersuchung dieses Phänomens wurde

beobachtet, dass die Veränderung der Rakelfase auf Grund des Rakelprozesses eine abrasive Komponente haben muss. Es wurden auf der Druckform und an der Rakel Partikel beobachtet, die durch den Abrieb der Rakel erzeugt wurden. Eine Untersuchung der Verunreinigungen zeigte, dass es sich um dünne und lange Partikel handelte, die auf Grund ihrer dünnen Form leicht in noch kleinere Fragmente zerbrechen können. In Abbildung 36 sind verschiedene Mikroskopaufnahmen einer Rakel und den gefundenen Partikeln zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich Partikel direkt an der Kontaktzone sammeln können. Die sich ablösenden Partikel können eine Länge von mehreren Millimetern und eine Dicke von unter  $10\text{ }\mu\text{m}$  haben und sind dementsprechend fragil. Die bräunliche Verfärbung der Metallpartikel ist auf Korrosion zurückzuführen.



**Abbildung 36:** Verschiedene Mikroskopaufnahmen einer verschlissenen Rakel und den entstandenen Partikeln. Die Aufnahmen wurden mit unterschiedlichen Vergrößerungen gemacht. Dies zeigt, dass die Form und Größe der durch den Rakelabrieb entstandenen Partikel stark variieren kann.

Aus den Beobachtungen folgt, dass die Rakelanpresskraft für die Reproduzierbarkeit des Tiefdruckprozesses einen großen Einfluss hat. Die Beobachtungen im vorherigen Kapitel zeigen, dass die Ausbildung der Kontaktzone und des effektiven Rakelwinkels  $\theta_{eff}$  nicht durch rein plastische Verformung der Rakelfase, sondern ebenfalls durch mechanische Abrasion beeinflusst wird. Für den eigentlichen Rakelprozess ist der effektive Rakelwinkel  $\theta_{eff}$  entscheidend, der sich während des Prozesses einstellt und nicht der Winkel, der als Rakelwinkel eingestellt wird. Für die Breite der Kontaktzone gilt, dass sie mit größerem effektiven Rakelwinkel kleiner wird und umgekehrt. Dies ist in Abbildung 34 schematisch dargestellt. Wird die Rakel stärker an die Druckform angepresst, liegt sie auf Grund der stärkeren Durchbiegung flacher an und es entsteht eine breitere Kontaktzone. Mit  $d = d' = 150 \mu\text{m}$  folgt:

$$b = \frac{d}{\sin \theta_{eff}} \rightarrow \frac{b}{b'} = \frac{\sin \theta'_{eff}}{\sin \theta_{eff}} \quad (22)$$

Gleichung 22 beschreibt das Verhältnis der Kontaktzonenbreiten  $b$  als Funktion der effektiven Rakelwinkel  $\theta_{eff}$  und  $\theta'_{eff}$ . In Tabelle 17 ist dargestellt, wie breit die Kontaktzonen bei unterschiedlichen effektiven Rakelwinkeln sind. Somit ist die Kontaktzone bei reiner Berührung mit minimaler Rakelanpresskraft, so dass die Rakel nur leicht an der Druckform anliegt, bei einem eingestellten Rakelwinkel von  $\theta = 65^\circ$ ,  $165 \mu\text{m}$  breit. Für eine Rakelanpresskraft von  $0,25 \text{ N/mm}$  hat bildet sich eine Kontaktzonenbreite von  $\approx 205 \mu\text{m}$  aus. Für die im Experiment maximal Rakelanpresskraft von  $1,5 \text{ N/mm}$  bildet sich entsprechend eine Kontaktzonenbreite von  $\approx 350 \mu\text{m}$  aus.

**Tabelle 17:** Breite von Kontaktzonen mit unterschiedlichen effektiven Rakelwinkeln aus Abbildung 35

Rakelanpresskraft		effektiver Rakelwinkel $\theta_{eff}$		Breite der Kontaktzone $b$
0,25 N/mm	→	$\approx 47^\circ$	→	$\approx 205 \mu\text{m}$
1,5 N/mm	→	$\approx 25,6^\circ$	→	$\approx 350 \mu\text{m}$
0 N/mm	→	$\approx 65^\circ$	→	$\approx 165 \mu\text{m}$

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, wurden Untersuchungen durchgeführt, die zu dem Ergebnis kamen, dass beispielsweise das Auftreten von Rotznasen auf das Verhältnis von Kontaktzonenbreite bzw. Rakelkanallänge zu Näpfchenöffnung zurückzuführen ist. In Abschnitt 4.5 ist die Beobachtung von Rotznasen dokumentiert. Die horizontale Näpfchenöffnung war trotz Unsicherheiten deutlich kleiner als  $165 \mu\text{m}$ , dennoch wurden Rotznasen ab einer Grenzggeschwindigkeit beobachtet (siehe Abbildung 57). Somit können die von Hoang, Ko (2015) beschriebenen Beobachtungen nicht bestätigt werden. Des weiteren haben Hoang, Ko (2015) keinen

Zusammenhang mit einer Grenzgeschwindigkeit beobachtet, ab der der Rotznaseneffekt auftreten sollte. Dies wurde in Abschnitt 4.5 beobachtet und dokumentiert (vgl. Hoang, Ko (2015)). Allerdings gelten die hier präsentierten Ergebnisse nur für verwendeten Rakeltyp. Für steifere Rakelmesser ist der Einfluss der Rakelanpresskraft nicht so groß, da sich die Rakel weniger durchbiegt. In Abschnitt 2.2 wurden die an der Rakel wirkenden Kräfte diskutiert. Aus Gleichung 9 geht eine Beziehung zwischen der Höhe des Rakelkanals  $D$  und den Rakelparametern hervor. Es wird angenommen, dass sich Gleichung 9 umschreiben lässt zu

$$D = b \cdot \tan \theta_{eff} \cdot C$$

wobei  $C$  eine Konstante ist. Für einen Vergleich des theoretischen Rakelkanals  $D$  und dem *effektivem* Rakelkanal  $D_{eff}$ , der sich durch den effektiven Rakelwinkel  $\theta_{eff}$  und effektiver Kontaktzonenbreite  $b_{eff}$  einstellt, ergibt sich mit Gleichung 22:

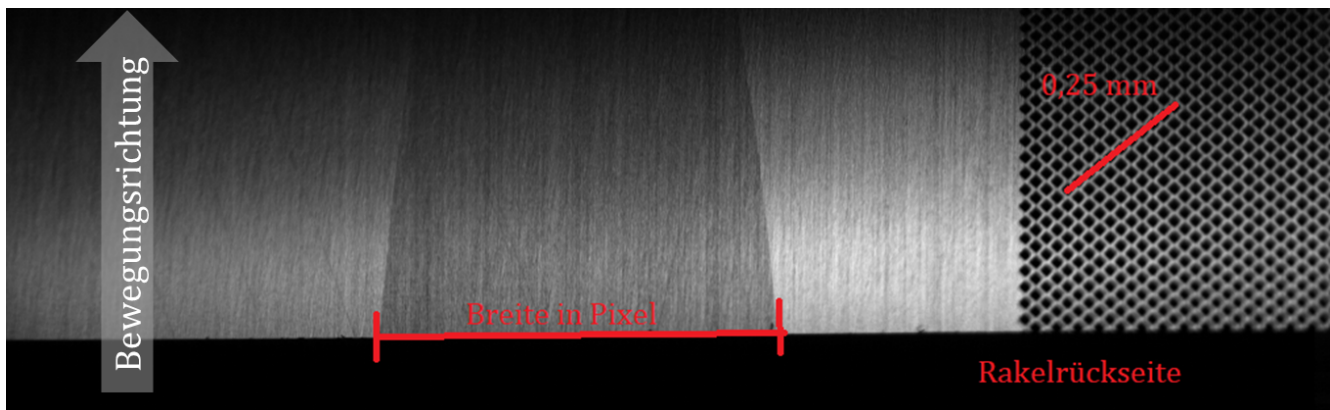
$$\begin{aligned} \frac{D_{eff}}{D} &= \frac{b_{eff} \cdot \tan \theta_{eff}}{b \cdot \tan \theta} \\ &= \frac{\cos \theta}{\cos \theta_{eff}} \end{aligned} \quad (23)$$

Für eine Rakelanpresskraft von 0,25 N/mm ergibt sich für  $D_{eff}/D$  ein Verhältnis von  $\approx 0,62$ . Bei sechsfach höherer Rakelanpresskraft von 1,5 N/mm ergibt das  $\approx 0,47$ . Dies bedeutet, dass, sofern die hier gemachten Näherungen gültig sind, die Durchbiegung der Rakel die Höhe des Rakelkanals und damit die Dicke des Schmierfilms reduziert. Es bedeutet auch, dass der genaue Wert der Rakelanpresskraft für die Dicke des Schmierfilms von zweitrangiger Bedeutung ist. Die hier gemachte Abschätzung zeigt, dass eine um den Faktor sechs höhere Rakelanpresskraft den Rakelkanal unwesentlich verändert. Da die Viskosität  $\eta$ , die Rakelgeschwindigkeit  $v$  und die Geometrie der Rakel linear in Gleichung 9 eingehen, sind diese möglicherweise viel einflussreichere Parameter für eine Abschätzung der Schmierfilmdicke. Dies erklärt möglicherweise, wieso es in realen Druckprozessen keine konkrete Vorschrift zum Einstellen der Rakelanpresskraft gibt.



## 4.2 Bestimmung der Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs

In den weiteren Abschnitten werden Tropfen aus Silikonöl unter bestimmten experimentellen Bedingungen auf einer Druckform abgerakelt und die Breite des Tropfens über dem zurückgelegten Rakelweg bestimmt. Für eine quantitative Auswertung wurden die Kameraaufnahmen zunächst kalibriert, sodass Pixel in eine metrische Längeneinheit und fps in eine zeitliche Einheit umgerechnet werden konnten. Für die Kalibration wurde die Gravur der Druckform verwendet. Es wurde ein Sleeve mit der Lineatur von 40 L/cm verwendet, was einem Näpfchenabstand von 25  $\mu\text{m}$  entspricht (vgl. Abbildung 37).

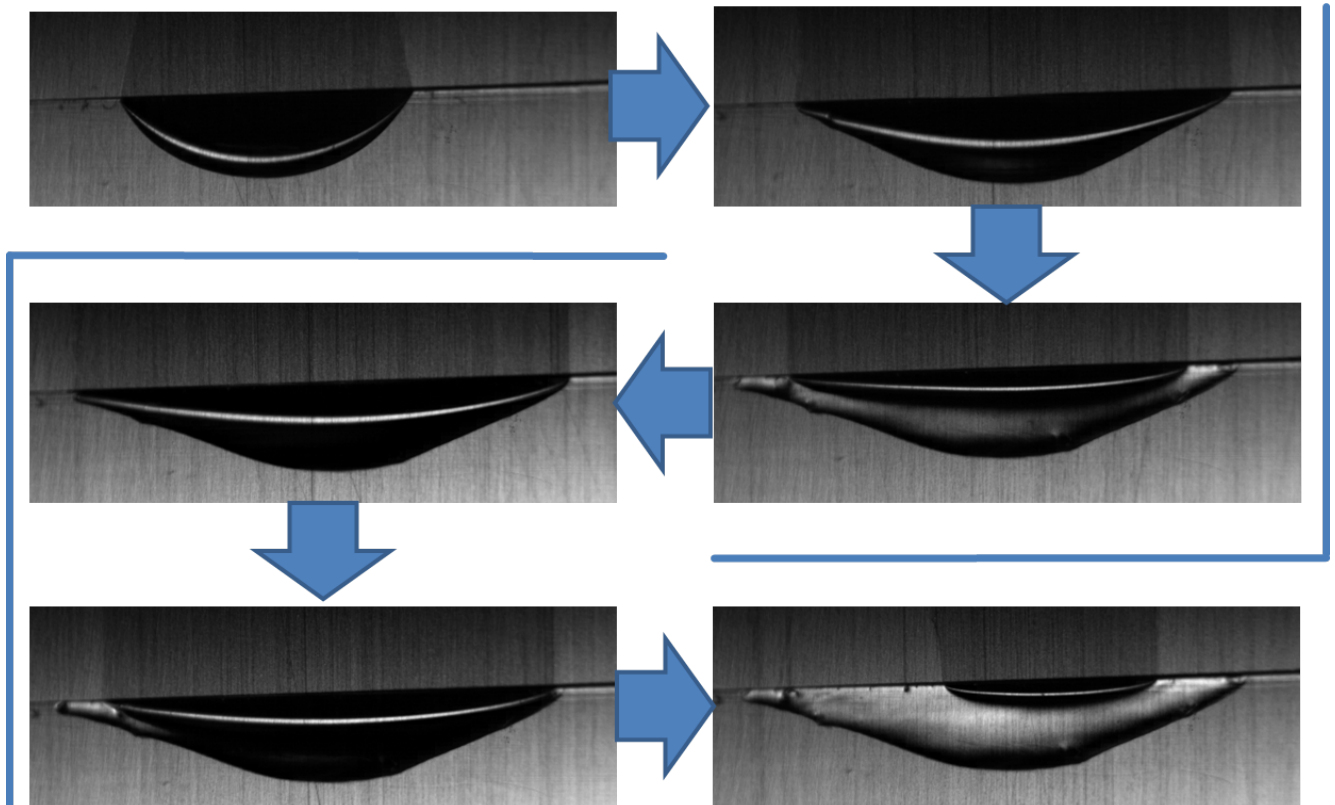


**Abbildung 37:** Aufnahme eines abgerakelten Tropfens auf der Druckform und die Durchführung der Bildkalibration. Die Tropfenbreite ist an den Flanken des Schmierfilms (roter Balken) zu erkennen. Die Näpfchen der Gravur haben einen Abstand von 25  $\mu\text{m}$ .

Über die bekannte Bildaufnahme rate, die in fps angegeben wird, kann über die zurückgelegte Wegstrecke pro Bild eine zeitliche Bildkalibration durchgeführt werden. Mit beiden Kalibrierungen, kann aus den gewonnenen Bilddaten die Rakelgeschwindigkeit berechnet werden. Der Rakelweg kann analog bestimmt werden.

Die Bestimmung der Tropfenbreite kann auf diese Weise nur zu Anfang des Rakelprozesses durchgeführt werden, da sich der Tropfen entleert und der Schmierfilm irgendwann inhomogen wird und abreißt. Die Tropfenbreite entspricht der Schmierfilmbreite. Abbildung 38 zeigt Auszüge einer Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in chronologischer Reihenfolge. Zur Verdeutlichung wurde eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit einer transparenten Rakel (Experimentanordnung T1) verwendet, um auch die Tropfenkontur erkennen zu können. Es ist zu sehen wie ein Tropfen unter der Rakel breiter wird, dann auf Grund seiner Volumenabnahme wieder kleiner wird und die Flanken des Schmierfilms zusammenlaufen. Der Rakelweg, der zwischen den einzelnen Auszügen zurückgelegt wurde beträgt 9,2 mm.





**Abbildung 38:** Auszüge einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme in chronologischer Reihenfolge. Das Experiment wurde in Experimentanordnung **T1** bei einer Rakelgeschwindigkeit  $v = 0,115 \text{ ms}^{-1}$  und Silikonöl mit einer Viskosität  $\eta = 200 \text{ mPas}$  durchgeführt.

### 4.3 Einfluss der Fluidviskosität auf den Rakelprozess

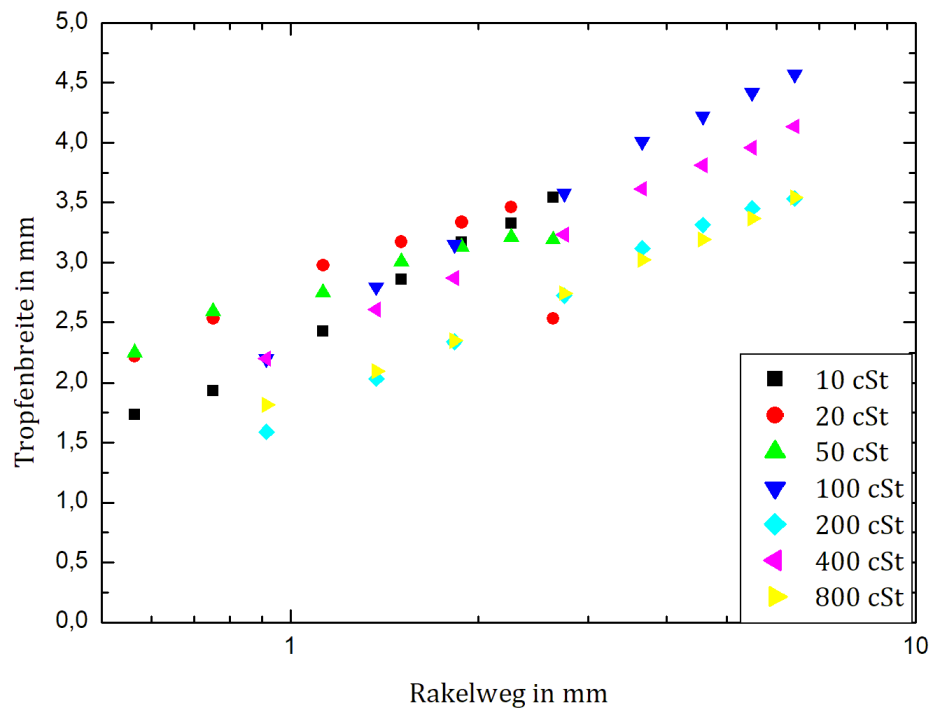
Wie in Abschnitt 3.4.3 beschrieben, werden zunächst für zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten Silikonöl-Tropfen auf einer Druckform abgerakelt und die Tropfenbreite wie in Abschnitt 4.2 in Abhängigkeit des Rakelwegs bestimmt. Da das Experiment in Experimentanordnung **M1** durchgeführt wird, liegt der optische Fokus der Hochgeschwindigkeitskamera im Bereich des Druckformzylinders hinter der Rakel. Die Lichtquelle ist so positioniert, dass zwischen Fluid und der verchromten Druckform-Oberfläche ein deutlicher Kontrast entsteht. Abbildung 39 und 41 zeigen für zwei unterschiedliche Rakelgeschwindigkeiten mit jeweils unterschiedlicher Fluidviskosität die Tropfenbreite auf der Druckform in Abhängigkeit des Rakelwegs. Abbildung 39 zeigt die Verteilung von Fluidtropfen (also die Tropfenbreite über zurückgelegten Rakelweg) bei einer Rakelgeschwindigkeit von  $v_a = 0,115 \text{ ms}^{-1}$  für die jeweils unterschiedliche Viskosität des verwendeten Silikonöls. Analog zu Abbildung 39 ist in Abbildung 41 die Tropfenverteilung über den zurückgelegten Rakelweg bei einer Rakelgeschwindigkeit von  $v_b = 0,23 \text{ ms}^{-1}$  aufgetragen. Die unterschiedliche Verteilung der Datenpunkte sind auf die nicht immer gleichen Bildaufnahmeraten der einzelnen Experimente zurückzuführen. In den Abbildungen 39 und 41 wurden

---

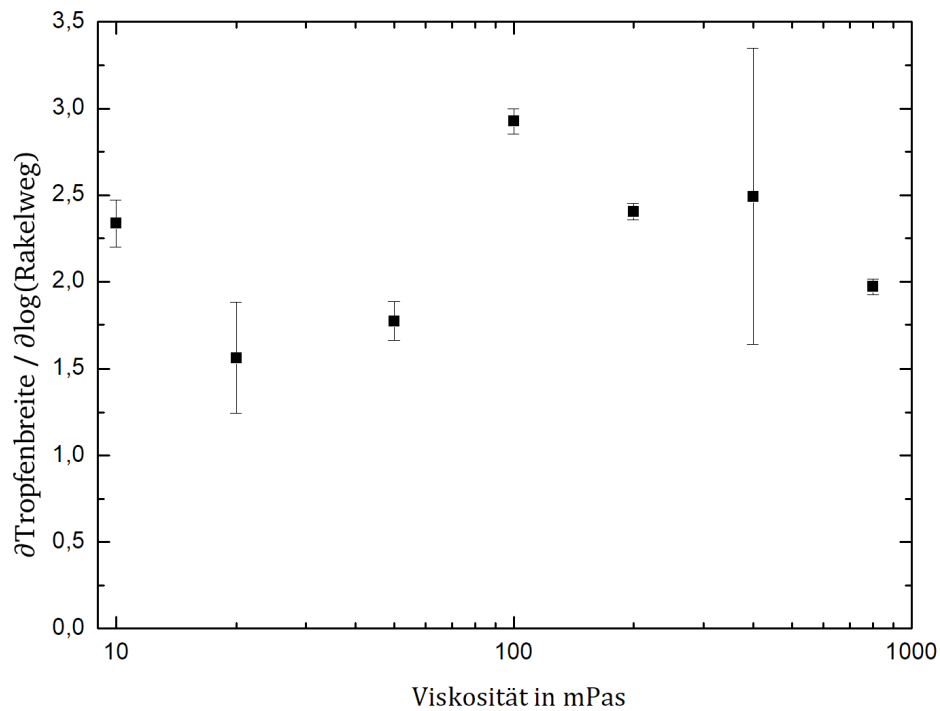
die horizontalen Achsen logarithmisch aufgetragen. In dieser Darstellung erscheinen die Punktverläufe näherungsweise linear, sodass für die Tropfenbreite  $T$  als Funktion des Rakelwegs  $R$  jeweils eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

$$T(R) = A + B \cdot \log(R) \quad (24)$$

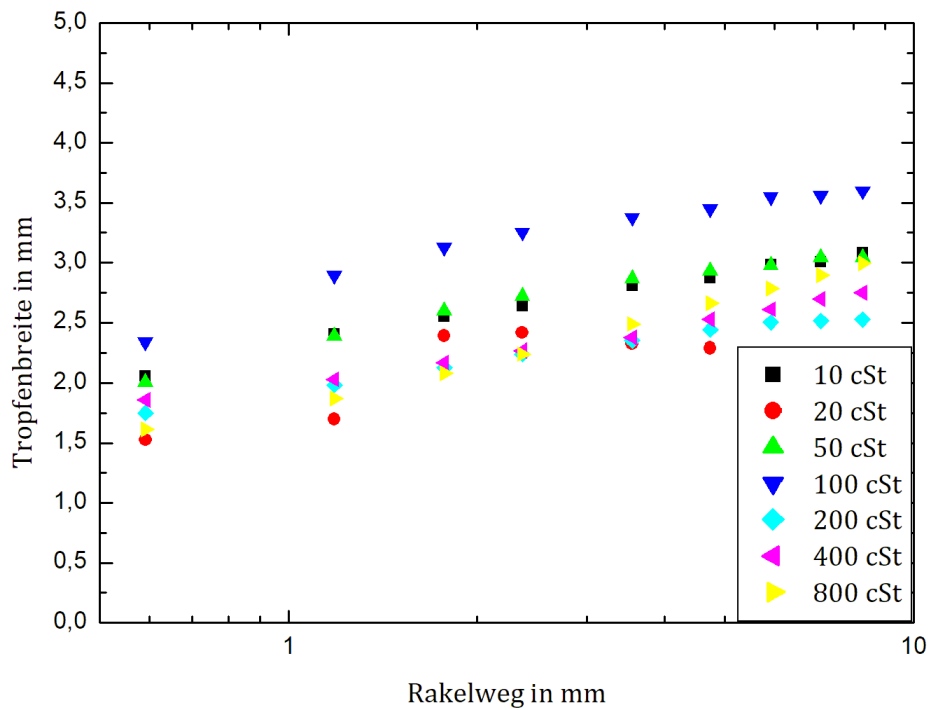
durchgeführt werden kann. Der Faktor  $B$  beschreibt die Steigung des linearen Verlaufs in halblogarithmischer Darstellung.  $A$  steht für die Breite des Tropfens zu Beginn des Rakelprozesses. Gleichung 4.3 gilt nur als Näherung, da der Tropfen unter der Rakel nicht beliebig breit werden kann und außerdem an Volumen verliert. Somit gilt die Annahme, dass die Tropfenbreite in der halblogarithmischen Darstellung des Rakelwegs linear zunimmt, nur zu Beginn des Rakelprozesses. Die Gerade wird sich im späteren Verlauf des Rakelprozesses abflachen. In den Abbildungen 40 und 42 wurden die ermittelten Steigungen der Punktverläufe über der Viskosität aufgetragen. Die unterschiedlichen Unsicherheiten zeigen, dass die linearen Ausgleichsrechnungen nicht für alle Punktverläufe Ergebnisse mit gleicher Qualität liefern. Das kann so interpretiert werden, dass die gemessenen Tropfenbreiten Unsicherheiten aufweisen und dass eine lineare Ausgleichsrechnung nach Gleichung 4.3 modifiziert werden sollte. In Abbildung 40 und Abbildung 42 unterscheiden sich die Steigungen im Mittel voneinander. In Abbildung 40 ergibt sich eine gemittelte Steigung von  $B_{0,115} = 2,209 \pm 0,23$ , wohingegen sich in Abbildung 42 eine gemittelte Steigung von  $B_{0,23} = 0,859 \pm 0,19$  ergibt. Das bedeutet, dass in diesem Experiment die höhere Rakelgeschwindigkeit zu einer langsameren Verteilung des Silikonöltropfens geführt hat. Somit scheint in diesem Experiment die Rakelgeschwindigkeit einen Einfluss auf den Rakelprozess gehabt zu haben, was allerdings nicht geklärt werden konnte. Um die Unterschiede zwischen den Datenpunkten in den Abbildungen 42 und 40 erklären zu können, ist vermutlich eine detaillierte Aufklärung der Strömung während des Rakelprozesses notwendig und kann aus den verfügbaren Daten nicht geklärt werden. Möglicherweise wurden auch die Randbedingungen der Experimente nicht exakt reproduziert, was die systematischen Unterschiede ebenfalls erklären könnte. Die Fluidviskosität scheint auf die Tropfenbreite unter der Rakel keinen direkten Einfluss zu haben.



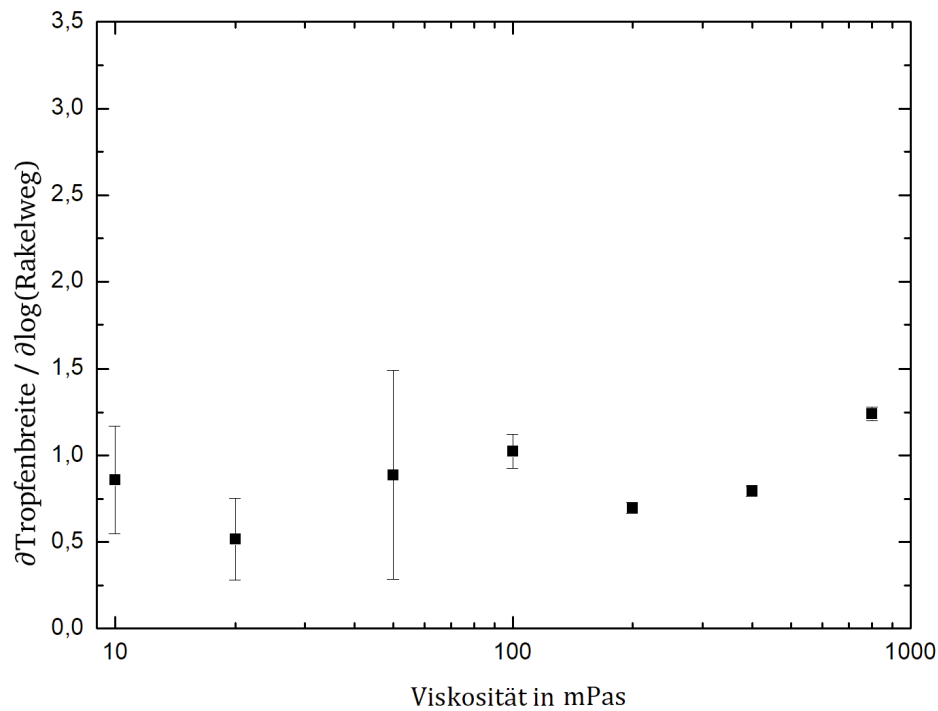
**Abbildung 39:** Tropfenbreite auf dem glatten, ungravierten Bereich bei  $v_a = 0,115 \text{ ms}^{-1}$  in Abhängigkeit des zurückgelegten Rakelwegs für Tropfen unterschiedlicher Viskosität. (Experimentanordnung M1)



**Abbildung 40:** Steigung der Punktverläufe aus Abbildung 39 für  $v_a = 0,115 \text{ ms}^{-1}$



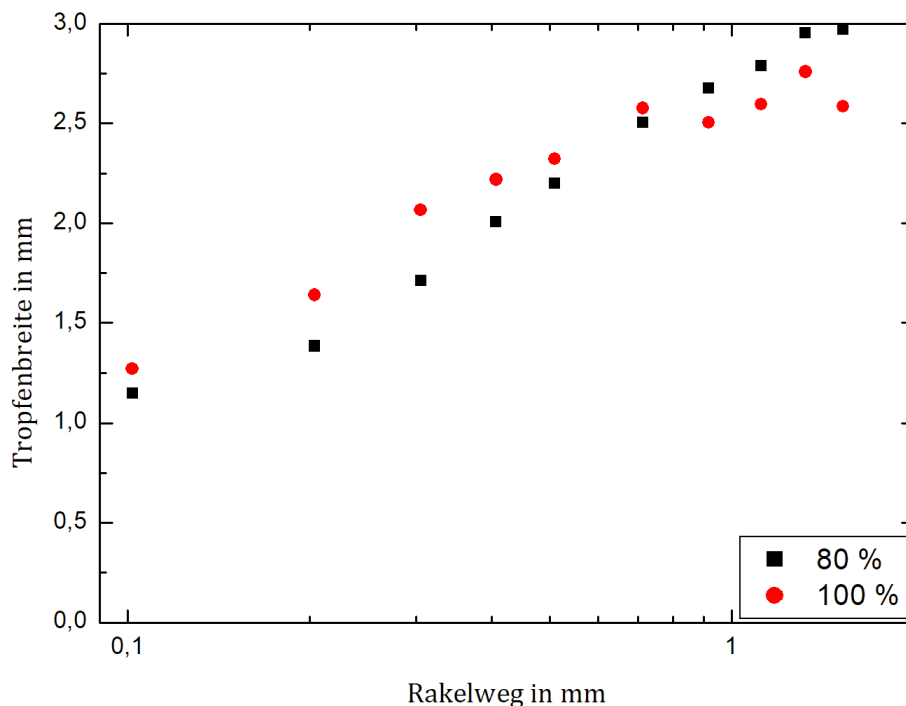
**Abbildung 41:** Tropfenbreite auf dem glatten, ungravierten Bereich bei  $v_b = 0,23 \text{ ms}^{-1}$  in Abhängigkeit des zurückgelegten Rakelwegs für Tropfen unterschiedlicher Viskosität. (Experimentanordnung M1)



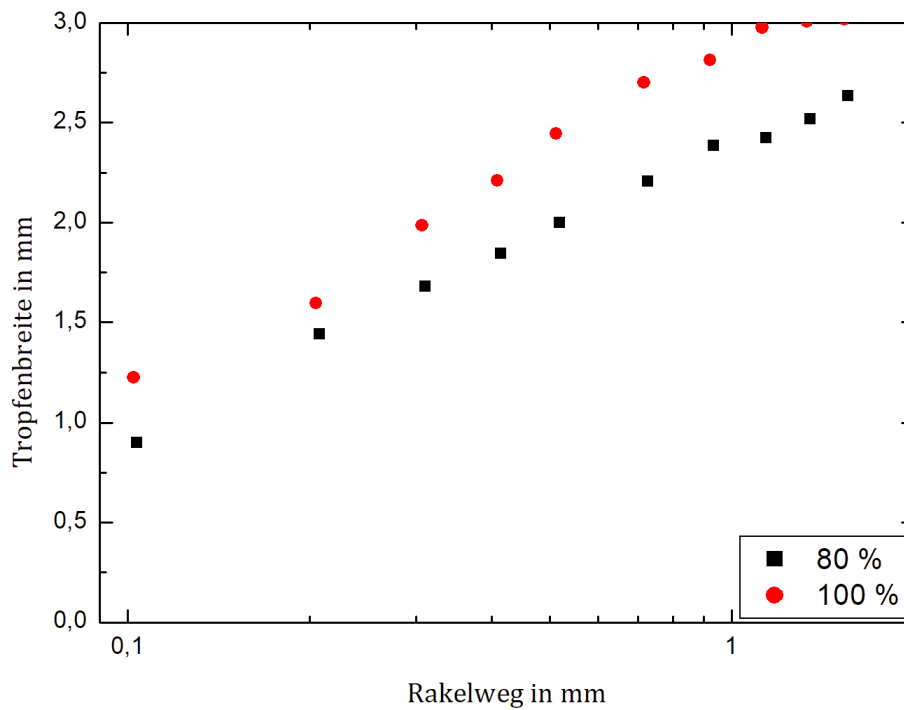
**Abbildung 42:** Steigung der Punktverläufe aus Abbildung 41 für  $v_b = 0,23 \text{ ms}^{-1}$

#### 4.4 Einfluss der Tiefdruck-Gravur auf die Tropfenbreite unter der Rakel

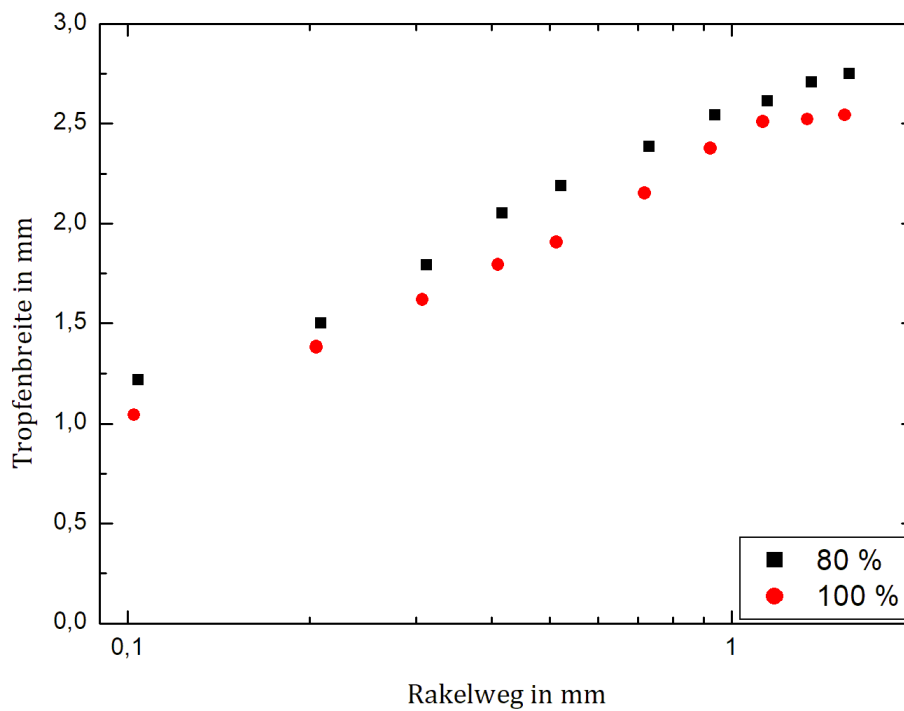
Wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben, wurden Silikonöle mit jeweils unterschiedlicher Viskosität auf einer Druckform abgerakelt, auf denen sich Bereiche mit unterschiedlichen Gravurparametern befanden. Die Abbildungen 43, 44, 45 und 46 zeigen die Breite der unterschiedlichen Tropfen unter der Rakel für jeweils Gravuren mit den Tonwerten von 80 % und 100 % in Abhängigkeit vom Rakelweg. Die Daten wurden halblogarithmisch dargestellt, um diese mit den Daten aus Abbildung 39 und 41 vergleichen zu können. Es ist zu erkennen, dass auch unter Einfluss der Gravur die Tropfenbreite logarithmisch verläuft. In den Abbildungen 43, 44, 45 und 46 wurden die Tropfenbreite auf der horizontalen Achse logarithmisch dargestellt und erscheinen dadurch linear. Die Daten sind im Anhang in Abschnitt A.1.3 aufgeführt. In Abbildung 47 sind die Steigungen für die verschiedenen Viskositäten und zwei Gravurparameter über dem Rakelweg aufgetragen. Es ist zu sehen, dass sich die Steigungen allesamt in einem Bereich von 1,2 und 1,8 befinden und keine eindeutige Korrelation mit dem Tonwert oder der Viskosität erkennbar ist.



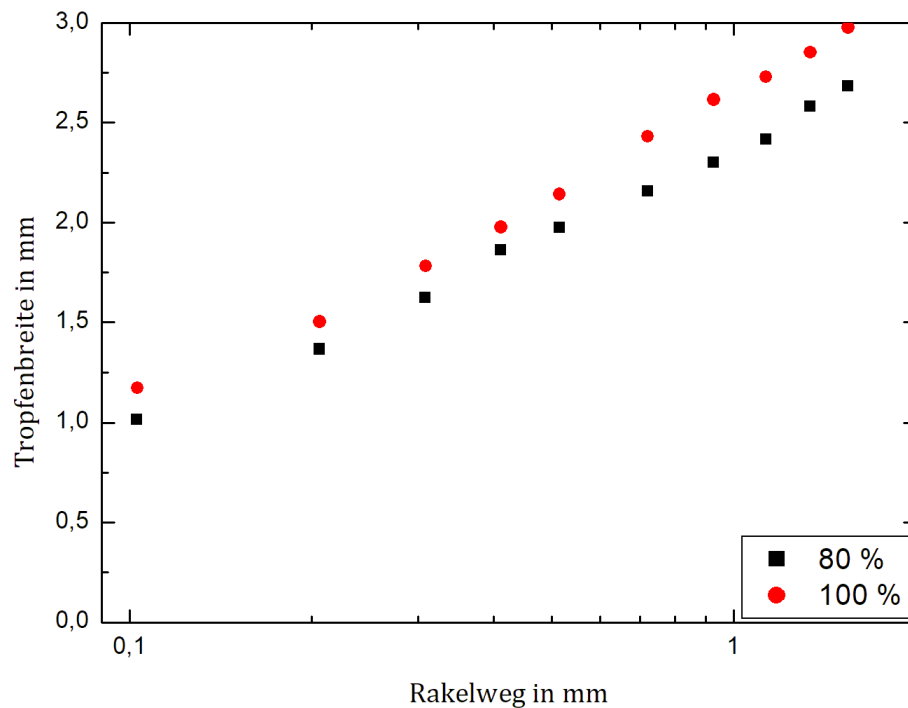
**Abbildung 43:** Tropfenbreite in Abhängigkeit vom Rakelweg bei einer Viskosität  $\eta_1 = 100$  mPas und Gravuren mit 80 % und 100 % Tonwert (Experimentanordnung M1)



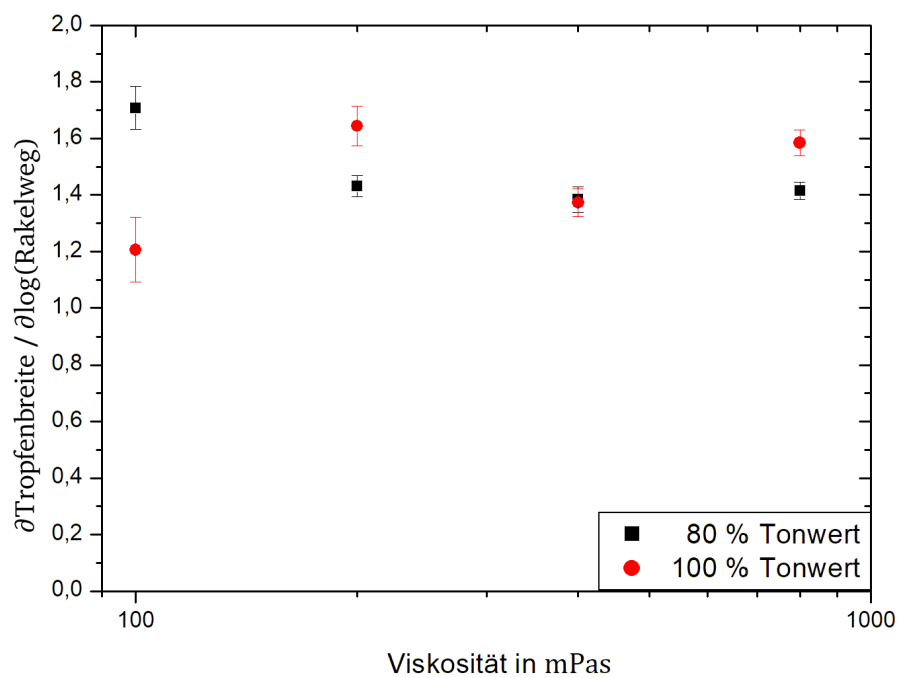
**Abbildung 44:** Tropfenbreite in Abhängigkeit vom Rakelweg bei einer Viskosität  $\eta_2 = 200$  mPas und Gravuren mit 80 % und 100 % Tonwert (Experimentanordnung M1)



**Abbildung 45:** Tropfenbreite in Abhängigkeit vom Rakelweg bei einer Viskosität  $\eta_3 = 400$  mPas und Gravuren mit 80 % und 100 % Tonwert (Experimentanordnung M1)



**Abbildung 46:** Tropfenbreite in Abhängigkeit vom Rakelweg bei einer Viskosität  $\eta_4 = 800$  mPas und Gravuren mit 80 % und 100 % Tonwert (Experimentanordnung M1)



**Abbildung 47:** Steigungen  $B$  die nach Gleichung 4.3 aus den Punktverläufen in den Abbildungen 43, 44, 45 und 46 für jeweils 80 % und 100 % Tonwert in Abhängigkeit der Viskosität  $\eta$  bestimmt wurden

---

Eine Ausgleichsrechnung für die entsprechenden Daten in Abschnitt 4.3, in dem die Tropfenverbreiterung auf ungravierten Bereichen der Druckform bestimmt wurde, durchgeführt. Für die Experimente zum Einfluss der Gravurparameter auf die Tropfenbreite unter der Rakel für die Viskositäten 100 mPas, 200 mPas, 400 mPas und 800 mPas wurde jeweils für die beiden Gravurparameter 80 % und 100 % Tonwert eine gemittelte Steigung von  $B_{80\%} = 1,484 \pm 0,05$  und  $B_{100\%} = 1,452 \pm 0,06$  ermittelt. Somit hat die Gravur der Druckform offenbar einen Einfluss auf die Tropfenbreite im Vergleich zu einer ungravierten Oberfläche (vgl. Abschnitt 4.3 auf S. 77). Die Gravur sorgt offenbar dafür, dass das Fluid schneller unter der Rakel verteilt wird, sodass die Tropfen in gravierten Bereichen schneller verbreitert werden. Allerdings ist zwischen den Gravuren mit unterschiedlichen Tonwerten kein Unterschied zu erkennen.

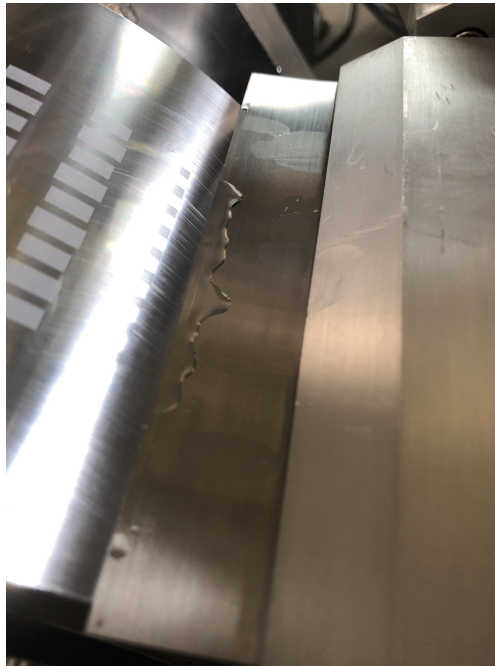
---

#### 4.4.1 Untersuchung zum Drip-Off-Effekt

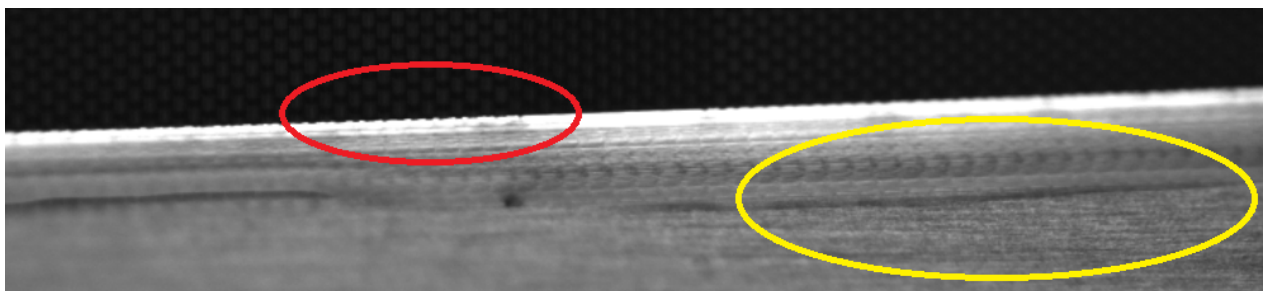
---

Oft lässt sich beobachten, dass sich während des Rakelprozesses Fluid auf der Rakelrückseite in Form von anwachsenden Tröpfchen ansammelt. Wie in Abschnitt 2.1.7 beschrieben, wird dieser Effekt in dieser Arbeit als Drip-Off-Effekt bezeichnet. In Abbildung 48 ist dieser Effekt auf einer der Rakelrückseite einer benutzten Rakel zu erkennen. Der Effekt tritt, unter den passenden Bedingungen, kontinuierlich auf und findet mit steigender Druckgeschwindigkeit in kürzerer Zeit statt. Der Effekt ist nicht immer zu beobachten und hängt von den Randbedingungen des Rakelprozesses ab, die unbekannt sind. Es ist zu beobachten, dass der Effekt nur an Stellen auftritt, an denen die Rakel über gravierte Flächen gleitet. An glatten, ungravierten Stellen tritt der Effekt nicht oder nicht so stark auf. In Abbildung 48 wurde eine Tiefdruckform verwendet, bei der sich im mittleren Bereich gravierte Bereiche befinden. Am Rande des Sleeves sind keine Gravuren und es ist zu erkennen, dass sich an diesen Stellen kein Fluid sammelt.





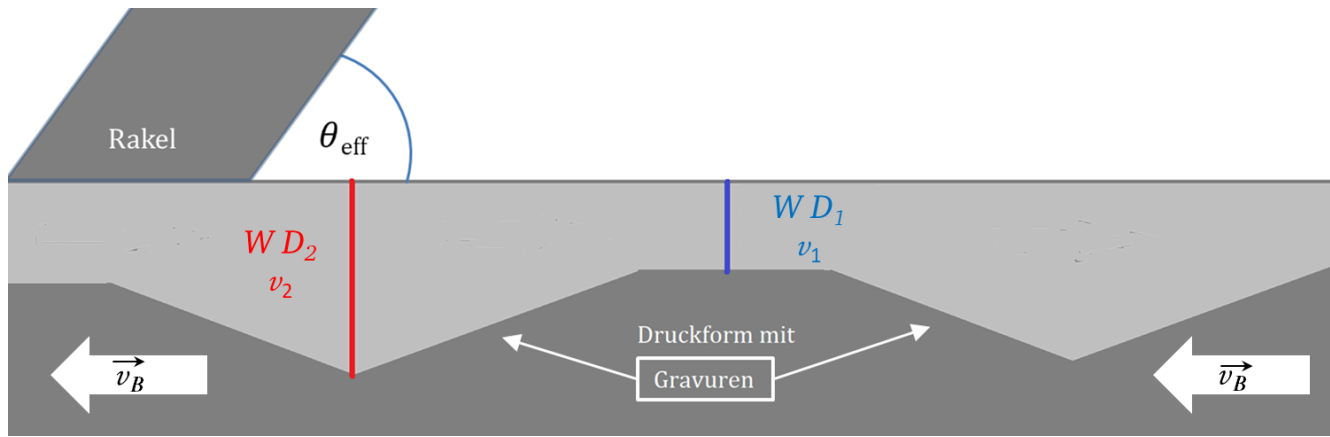
**Abbildung 48:** Fluidansammlungen auf einer Rakelrückseite, die sich durch den Drip-Off-Effekt im Bereich der Gravuren gebildet hat



**Abbildung 49:** Auszug (frame bzw. Einzelbild) einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme von der Rakelrückseite. Aus den Gravuren wird Fluid auf die Rakelrückseite befördert. An der Rakelfase sind diese als eine Art Sägezahnmuster (rot) zu erkennen. Nach einiger Zeit formieren sich auf der Rakelrückseite größere Tropfen, hier auf Grund des Kontrastunterschiedes zu erkennen (gelb)

In Abbildung 49 ist eine Nahaufnahme der Rakelrückseite zu sehen (Experimentkategorie **M1**). Im Hintergrund (schwarz) befindet sich die Druckform, die sich in den Aufnahmen vertikal nach oben bewegt. Die Position der Rakel ändert sich nicht. An der Rakelfase (rote Markierung) ist ein feines Sägezahnmuster zu erkennen. Dieses entsteht durch einen optischen Effekt, der von kleinen Fluidvolumina verursacht wird, die aus den Nöpfchen auf die Rakelrückseite gelangen. Dort sammelt sich das Fluid zu größeren Tröpfchen (gelbe Markierung). Zwischen der roten und der gelben Markierung ist kein Sägezahnmuster an der Rakelfase zu sehen. An dieser Stelle befand sich keine Gravur auf der Druckform.

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, wurde beobachtet, dass der Drip-Off-Effekt nur an Stellen der Rakel auftritt, die während des Rakelprozesses in Kontakt mit gravierten Bereichen der Druckform kommen. An ungravierten Stellen tritt der Effekt nicht auf. In Abbildung 50 ist ein seitlicher Querschnitt des Rakelkanals  $D \cdot W$  (grauer Bereich), also dem Bereich zwischen Rakelfase und gravierten Druckformoberfläche, als Skizze dargestellt. Die Skizze soll verdeutlichen, dass der Rakelkanal an gravierten Stellen der Druckform nicht überall gleich groß ist, und sich der Querschnitt  $D_x \cdot W$  des Rakelkanals verändert, je nachdem, ob sich die Rakel über einer Gravur oder einem Steg, also der Bereich zwischen den Gravuren, befindet. Im ersten Fall entspricht der Querschnitt  $D_2$ , an dem die Strömungsgeschwindigkeit  $v_2$  und der Druck  $P_2$  herrscht. Analog gilt das für  $D_1$ ,  $v_1$  und  $P_1$ . Die grauen Pfeile in Abbildung 50 deuten eine Fluidströmung innerhalb des Rakelkanals (hellgrauer Bereich) relativ zur Druckform an, die im Rakelprozess der Rakelgeschwindigkeit entspricht.



**Abbildung 50:** Schematische Skizze eines Querschnitts des Rakelkanals (hellgrau) zwischen Rakel und gravierten Bereichen einer Druckform. An den Positionen von  $D_1$  und  $D_2$  herrschen die Drücke  $P_1$  und  $P_2$ .

Mit Hilfe von Abbildung 50 kann eine Abschätzung für den Druck  $P$  innerhalb des Rakelkanals vorgenommen werden. Da in der Arbeit inkompressible Fluide verwendet wurden, gilt die Bernoulli-Gleichung. Da  $D_1 \ll D_2$ , folgt, dass  $\frac{v_2}{v_1} \ll 1$ . Der Einfluss der Schwerkraft kann hier vernachlässigt werden, da durch die hohen Rakelgeschwindigkeiten verursachten Scherkräfte weitaus größer sind. Werden die Annahmen in die Bernoulli-Gleichung eingesetzt, ergibt sich:

$$P_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = P_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad (25)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho v_1^2}{2} \left( \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 - 1 \right) \quad (26)$$

$$\Rightarrow P_2 \ll P_1 \quad (27)$$

---

Dies bedeutet, dass der Druck im Rakelkanal  $P$  stark schwankt, wenn die Rakelfase über gravierte Bereiche der Druckform gleitet, da der Rakelkanal zwischen Steg und Rakelfase viel kleiner als im Bereich der Gravur ist. Durch das Schwanken des Drucks könnte eine Art Pumpeneffekt im Bereich der Gravur entstehen, der Fluid auf die Rakelrückseite befördert. Dies würde auch erklären, wieso der Effekt nie oder kaum an ungravierten Stellen der Druckform beobachtbar ist.

Es konnte nicht abschließend geklärt werden, wie sich die Gravurparameter, die Rakelgeschwindigkeit und die Rakelparameter auf die Stärke des Effekts auswirken. Möglicherweise kann der Drip-Off-Effekt durch Variation von effektivem Rakelwinkel, Rakelgeschwindigkeit und Druckformparameter beeinflusst werden. Auf Grund der Verwirbelungen, die von Strauß (1975) vorhergesagt wurden, kann der Druckverlauf innerhalb des Rakelkanals lokal sehr unterschiedlich sein. Wie computerbasierte Simulationen zum Druckverlauf im Rakelkanal zeigen, können die Drücke je nach Form der Kontaktzone stark schwanken und es kann im Rakelkanal Bereiche geben, die abstoßende Kräfte und an anderen Stellen anziehende Kräfte zwischen Rakel und Druckform erzeugen (vgl. Tjiptowidjojo, Hariprasad, Schunk (2018)).

---

## 4.5 Einfluss der Kapillarzahl auf die Tropfenbreite unter der Rakel

---




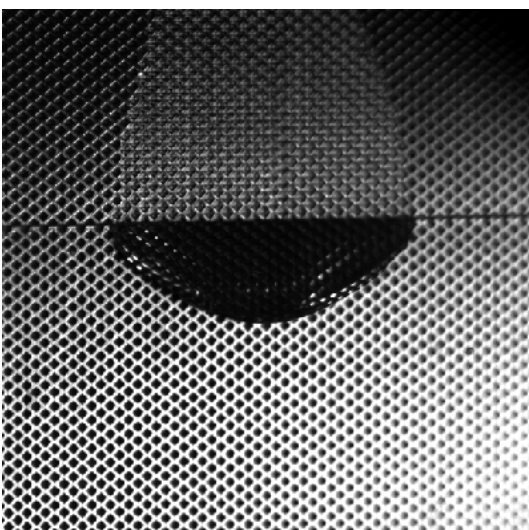
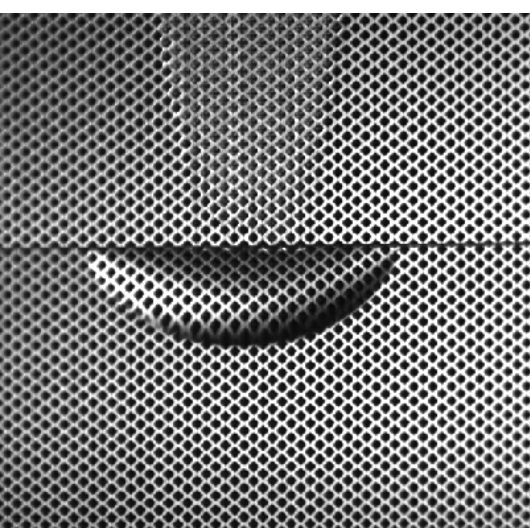
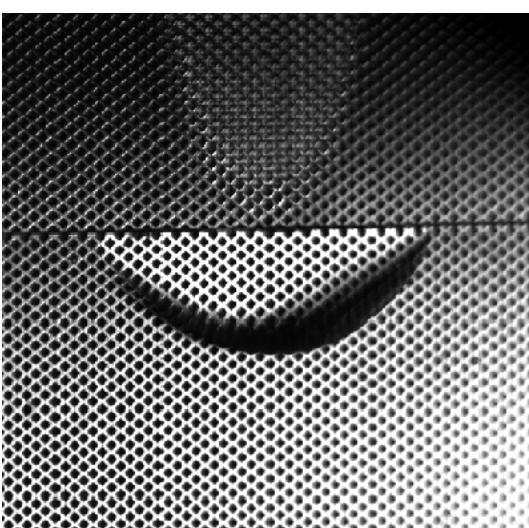
In Kapitel 2 wurde beschrieben, dass die Kapillarzahl  $Ca$ , in der das Produkt aus Prozessgeschwindigkeit und Viskosität eingeht (vgl. Abschnitt 2.3.2 auf Seite 28), für das Benetzungs- und Befüllungsverhalten des Fluids unter der Rakel zur Charakterisierung des jeweiligen Rakelprozesses verwendet wird. In Tabelle 13 auf Seite 65 ist eine Matrix aus Kapillarzahlen zu erkennen, welche aus unterschiedlichen Kombinationen aus Rakelgeschwindigkeiten und Fluidviskosität berechnet wurden. Es existieren somit für verschiedene Prozesse (Kombinationen aus Rakelgeschwindigkeit und Fluidviskosität) die selben Kapillarzahlen und es soll überprüft werden, ob die selben Kapillarzahlen unterschiedlicher Prozesse zu gleichen Ergebnissen führen. Die Beobachtungen, die bei dem Experiment gemacht werden, sollen hier an zwei Beispielen gezeigt und beschrieben werden. Im Experiment werden Silikonöle mit unterschiedlicher Viskosität  $\eta$  verwendet. Diese werden in Experimentanordnung **T1** auf einer gravierten Druckform (vgl. S. 47) mit verschiedenen Rakelgeschwindigkeiten abgerakelt. Es wird die Experimentanordnung **T1** verwendet, um die Tropfenkontur unter der Rakel beobachten zu können.

Im Folgenden werden zwei Tabellen (Tab. 18 und 19) aufgeführt, die jeweils zwei Paarungen aus Bilderserien beinhalten. Jede Tabelle steht für zwei durchgeführte Experimente, bei denen Fluidviskosität und Rakelgeschwindigkeit so kombiniert werden, dass sie für unterschiedliche Rakelprozesse die selbe Kapillarzahl ergeben. Die Bilderserien verlaufen chronologisch vertikal nach unten. Jede Spalte der Tabellen zeigt drei Bildauszüge von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Zeitpunkts bevor der Fluidtropfen die Rakel berührt. Die mittleren Zeilen zeigen wie der Tropfen abgerakelt wird und seine Kontur an die transparente Rakel anpasst. Die dritte Zeile zeigt einen Auszug kurz nach der Entleerung des Tropfens.

Tabelle 18 zeigt exemplarisch ein Experimentpaar eines zuvor durchgeführten Experiments, dem die Kapillarzahl  $Ca_{12} = 0,288$  zugeordnet sind. In der linken Spalte betrug die Rakelgeschwindigkeit  $v_1 = 0,115 \text{ ms}^{-1}$  und es wurde Silikonöl mit der Viskosität  $\eta_1 = 50 \text{ mPas}$  verwendet. In der rechten Spalte wurden entsprechend die Bilder eines Prozesses mit selbiger Kapillarzahl dargestellt, bei denen Silikonöl mit niedriger Viskosität ( $\eta_2 = 100 \text{ mPas}$ ) und der dazugehörigen Rakelgeschwindigkeit ( $v_2 = 0,058 \text{ ms}^{-1}$ ) verwendet wurden.

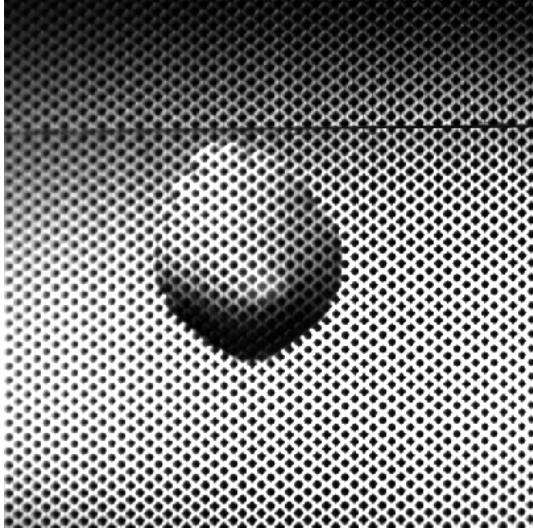
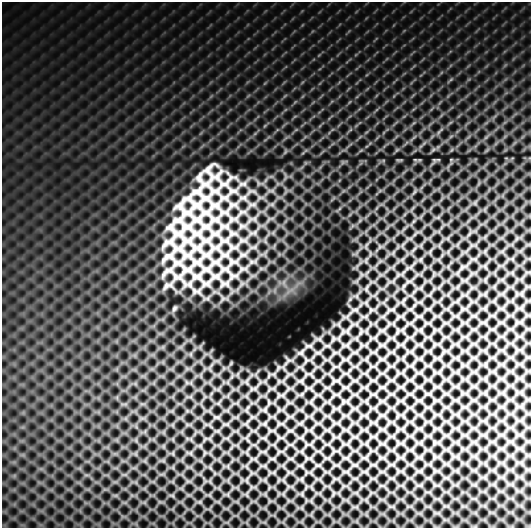
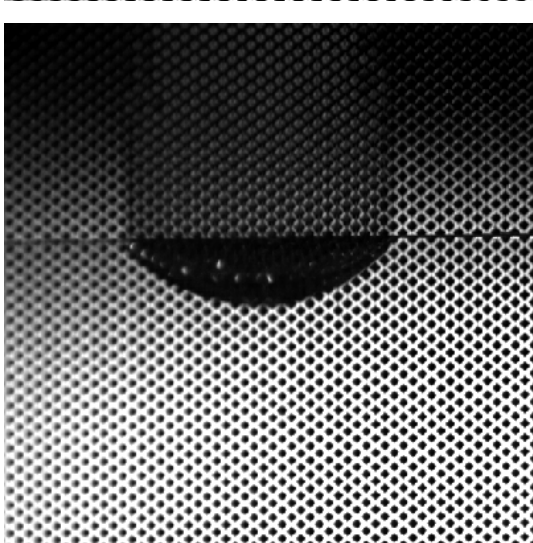
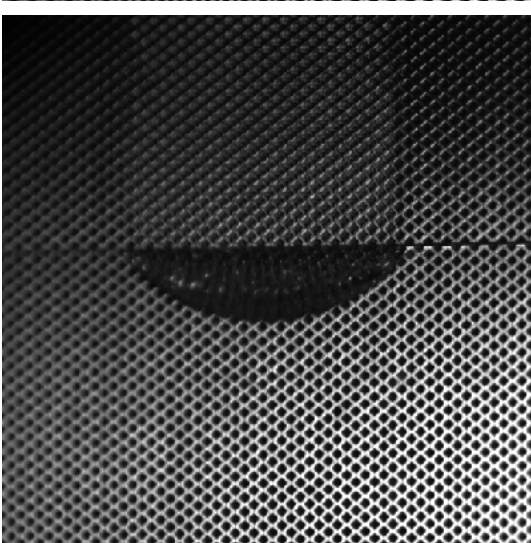
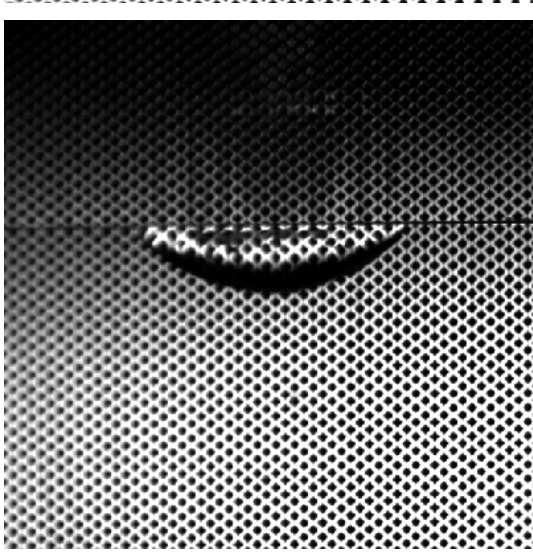
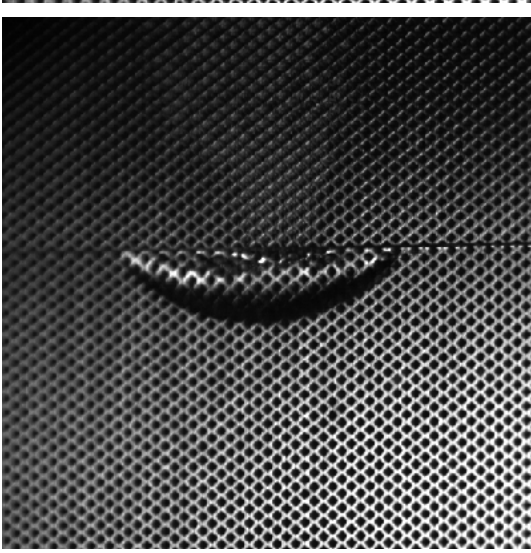


**Tabelle 18:** Auszüge von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von zwei unterschiedlichen Rakelprozessen mit Kapillarzahl  $Ca_{12} = 0,288$  im Vergleich

$\nu_1 = 0,115 \text{ ms}^{-1}; \eta_1 = 50 \text{ mPas}$	$\nu_2 = 0,058 \text{ ms}^{-1}; \eta_2 = 100 \text{ mPas}$
	
	
	



**Tabelle 19:** Auszüge von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von zwei unterschiedlichen Rakelprozesse mit Kapillarzahl  $Ca_{34} = 2,304$  im Vergleich

$v_3 = 0,23 \text{ ms}^{-1}; \eta_3 = 200 \text{ mPas}$	$v_4 = 0,115 \text{ ms}^{-1}; \eta_4 = 400 \text{ mPas}$
	
	
	

---

Tabelle 19 zeigt analog zu Tabelle 18 exemplarisch ein Experimentpaar, dem die Kapillarzahl  $Ca_{34} = 2,304$  zugeordnet wird. In der linken Spalte betrug die Rakelgeschwindigkeit  $v_3 = 0,23 \text{ ms}^{-1}$  und es wurde Silikonöl mit der Viskosität  $\eta_3 = 200 \text{ mPas}$  verwendet. In der rechten Spalte wurden entsprechend die Bilder dazu dargestellt, bei denen Silikonöl mit niedriger Viskosität ( $\eta_4 = 400 \text{ mPas}$ ) und der dazugehörigen Rakelgeschwindigkeit ( $v_4 = 0,115 \text{ ms}^{-1}$ ) verwendet wurden.

In den Abbildungen 51 und 52 wurden die aus den Kameraaufnahmen und der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Bildkalibration gewonnenen Daten über die Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs aufgetragen. Der Rakelweg wurde logarithmisch aufgetragen, da sich die Silikonöl-Tropfen zu Beginn des Rakelprozesses sehr schnell verteilen und im späteren Rakelprozess langsamer. In dieser Art der Darstellung erscheinen die Punktverläufe der Tropfenbreite über dem Rakelweg annähernd linear. Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, werden auch hier die Steigungen der Ausgleichsgerade verglichen.

Für Abbildung 51 betrugen die Steigungen:

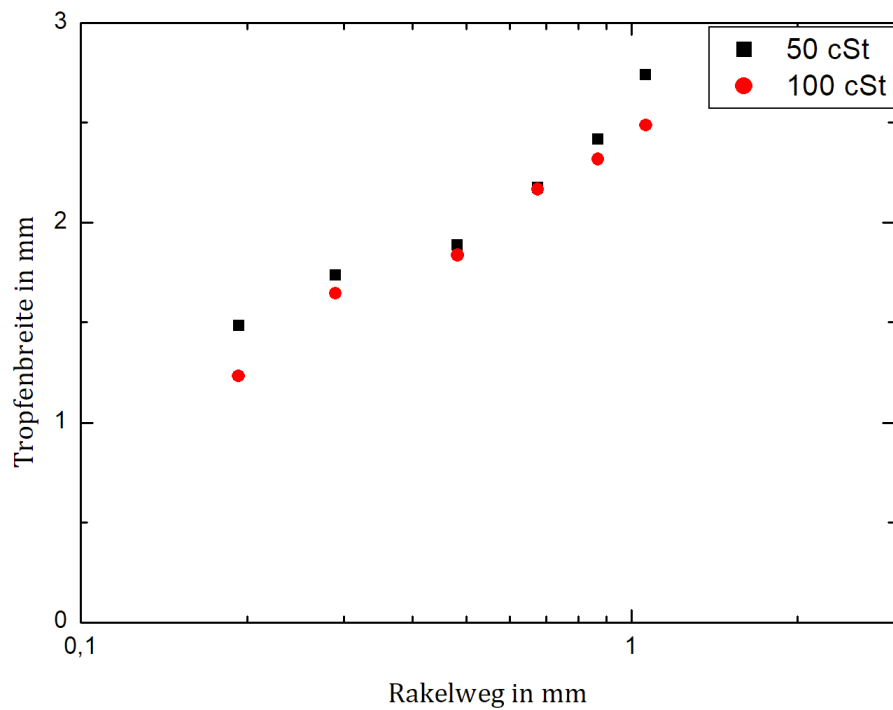
$$B_{50cSt} = 1,444 \pm 0,134 \text{ und } B_{100cSt} = 1,699 \pm 0,071;$$

Für Abbildung 52 wurden analog folgende Steigungen bestimmt:

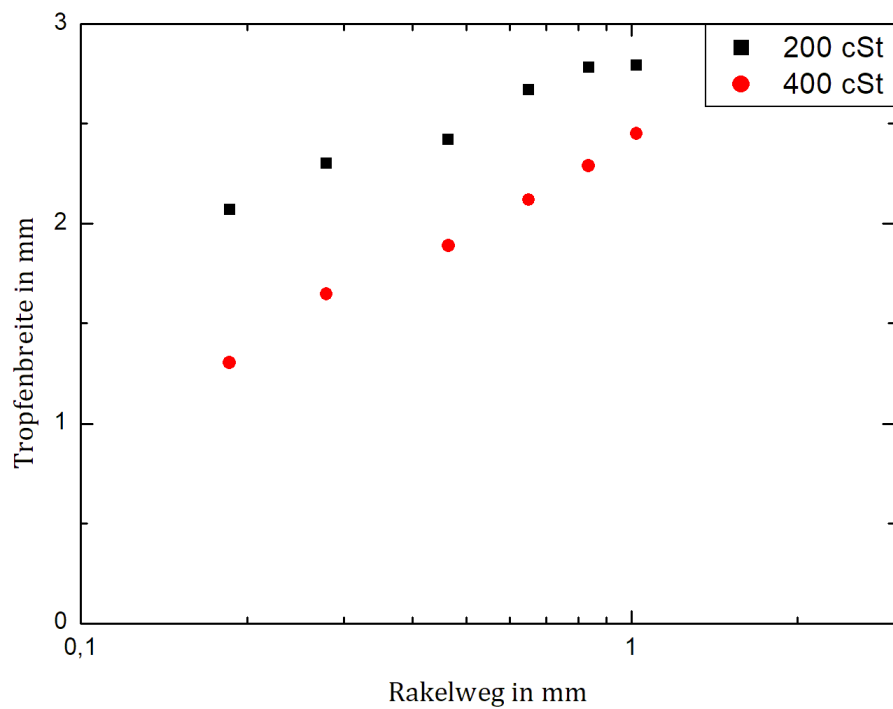
$$B_{200cSt} = 1,126 \pm 0,072 \text{ und } B_{400cSt} = 1,374 \pm 0,069;$$

Es ist zu erkennen, dass die Tropfen bei niedrigerer Viskosität unmittelbar vor dem Berühren der Rakel eine ungleichmäßigere Form ausweisen, als die Tropfen mit höherer Viskosität. Dies ist damit zu erklären, dass die Tropfen bei unterschiedlicher Viskosität etwa alle die gleiche Oberflächenspannung besitzen, sodass die Tropfen niedrigerer Viskosität schon direkt nach dem Absetzen auf der Druckform schneller zerfließen. Als erste Beobachtung lässt sich festhalten, dass die Kapillarzahlen der Prozesse fast um den Faktor 8 auseinander liegen. Obwohl sich die Kapillarzahlen in den Experimenten stark unterscheiden, lässt sich an den Ergebnissen kein signifikanter Einfluss auf die Tropfenverteilung, bzw. der Schmierfilmbreite, unter der Rakel erkennen. Die berechneten Steigungen liegen in etwa in der selben Größenordnung und sind damit als vergleichbar anzusehen.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur führt zu dem Widerspruch, dass die Kapillarzahl alleine kein Maß für die Befüllung der Tiefdruck-Gravur sein kann, obwohl dies oft angenommen wird. (vgl. Hu, Subramanian, Liu (2018)) Die Beobachtung der Tropfenkonturen zeigte keine deutlichen Unterschiede in der Benetzung der Druckform.



**Abbildung 51:** Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs für einen Prozess mit einer Kapillarzahl  $Ca = 0,288$ . (Experimentanordnung T1)



**Abbildung 52:** Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs für einen Prozess mit einer Kapillarzahl  $Ca = 2,304$ . (Experimentanordnung T1)

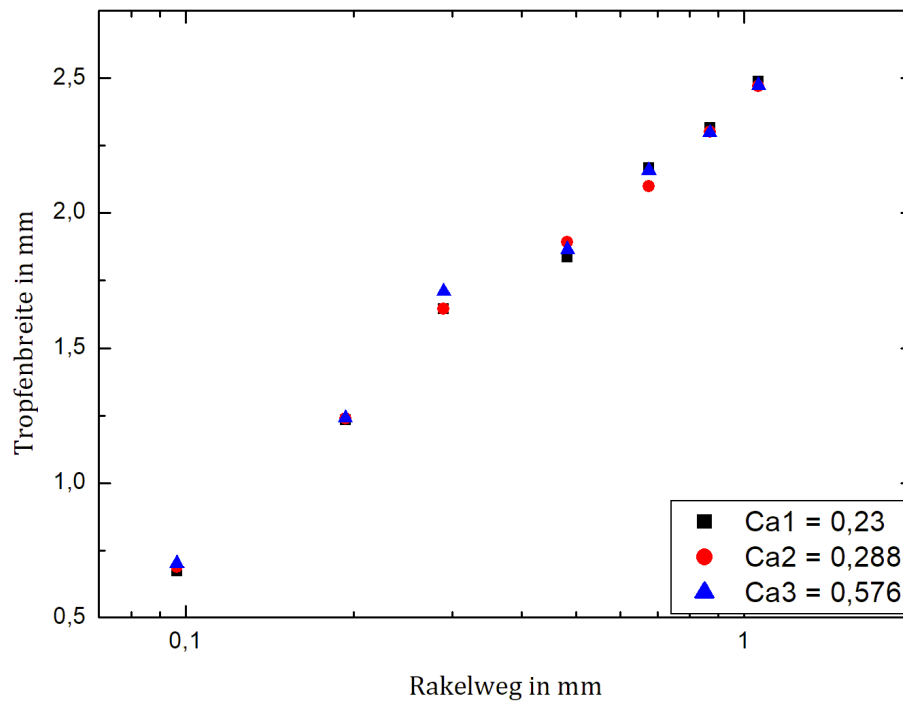


In den Abbildungen 53, 54, 55 und 56 sind die Tropfenbreiten über dem Rakelweg für Silikonöle mit drei verschiedenen Kapillarzahlen aus Tabelle 14 dargestellt. Es handelt sich um die identische Vorgehensweise wie zuvor, mit dem Unterschied, dass jeweils drei Prozesse mit drei unterschiedlichen Kapillarzahlen dargestellt sind. Es sei zusätzlich bemerkt, dass die in den Abbildungen dargestellten Daten zusätzlich jeweils einer Viskosität  $\eta$  zugeordnet sind. In den Abbildungen 53, 54, 55 und 56 wurde jeweils mit dem selben Silikonöl gearbeitet und die Kapillarzahl  $Ca$  im Prozess über die Rakelgeschwindigkeit variiert. Dieser Abschnitt kann den Abschnitt *Einfluss der Rakelgeschwindigkeit auf die Tropfenbreite unter der Rakel* bilden. Da jedoch letztlich die Kapillarzahl variiert wurde, wurde auf ein separates Unterkapitel verzichtet.

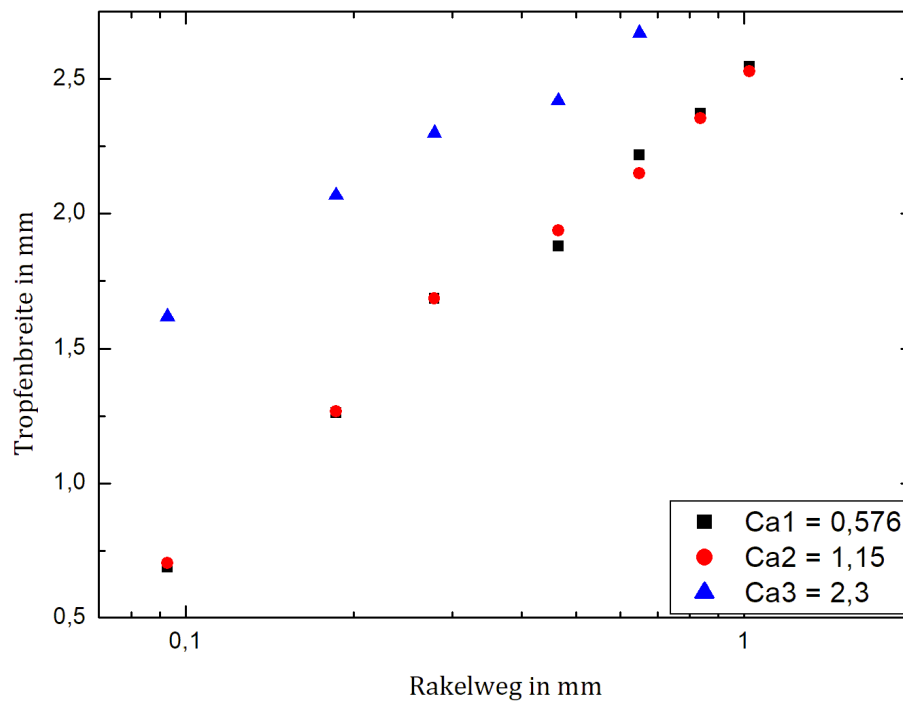
**Tabelle 20:** Berechnete Steigungen der in Abb. 53 - 56 dargestellten Tropfenbreiten

$\eta_1 = 100 \text{ mPas}$	$\eta_2 = 200 \text{ mPas}$	$\eta_3 = 400 \text{ mPas}$	$\eta_4 = 800 \text{ mPas}$
$B_{0,23} = 1,699 \pm 0,07$	$B_{0,576} = 1,739 \pm 0,07$	$B_{1,15} = 0,563 \pm 0,03$	$B_{2,3} = 1,651 \pm 0,09$
$B_{0,288} = 1,679 \pm 0,07$	$B_{1,15} = 1,698 \pm 0,07$	$B_{2,3} = 1,374 \pm 0,06$	$B_{4,6} = 1,699 \pm 0,02$
$B_{0,576} = 1,651 \pm 0,09$	$B_{2,3} = 1,124 \pm 0,08$	$B_{4,6} = 0,56 \pm 0,04$	$B_{9,2} = 1,658 \pm 0,05$

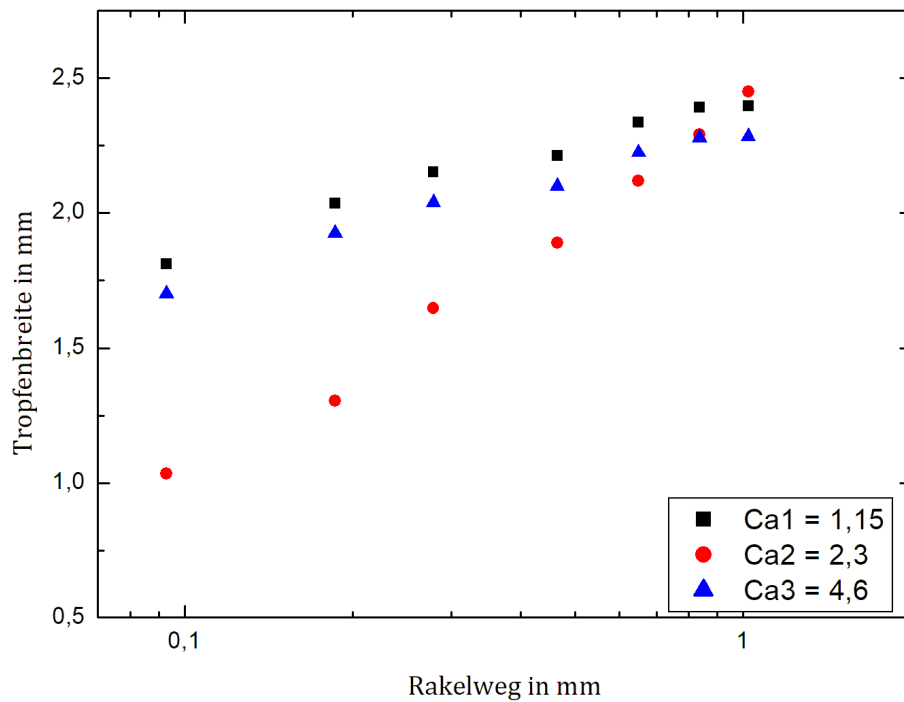
In Tabelle 20 sind die berechneten Steigungen der in den Abbildungen 53, 54, 55 und 56 dargestellten Punktverläufe aufgeführt. Fast alle Steigungen befinden sich im Bereich von  $B \approx 1,5$ . Die Ausreißer sind nur so zu erklären, dass die Experimente nicht korrekt durchgeführt wurden. Da die berechneten Werte also nur in kleinem Rahmen streuen, können die Randbedingungen der Experimente dennoch meist als reproduzierbar verstanden werden. Wie in den vorherigen Experimenten zeigt sich hier ebenfalls, dass sich die Tropfenbreite als Funktion des Rakelwegs in etwa logarithmisch verhält. Die Unterschiede in Abbildung 54 und 55 sind möglicherweise auf Ungenauigkeiten während der Durchführung der Experimente zurückzuführen, obwohl keine eindeutige Systematik erkennbar ist.



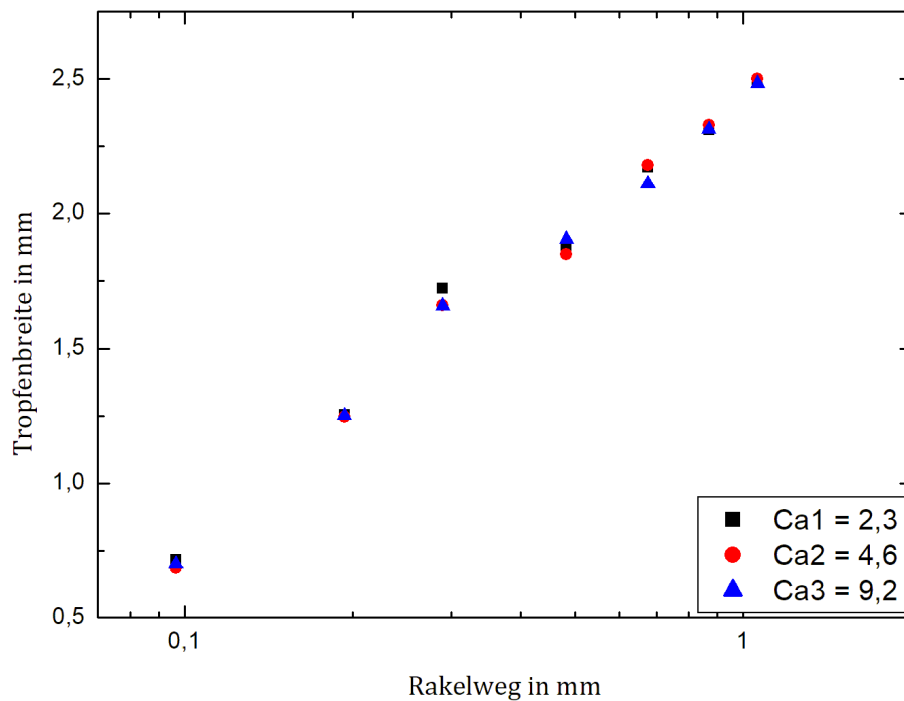
**Abbildung 53:** Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs für Prozesse mit verschiedenen Kapillarzahlen bei Fluidviskosität  $\eta_1 = 100$  mPas



**Abbildung 54:** Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs für Prozesse mit verschiedenen Kapillarzahlen bei Fluidviskosität  $\eta_2 = 200$  mPas



**Abbildung 55:** Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs für Prozesse mit verschiedenen Kapillarzahlen bei Fluidviskosität  $\eta_3 = 400$  mPas



**Abbildung 56:** Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs für Prozesse mit verschiedenen Kapillarzahlen bei Fluidviskosität  $\eta_4 = 800$  mPas

---

## Entstehung von Rotznasen

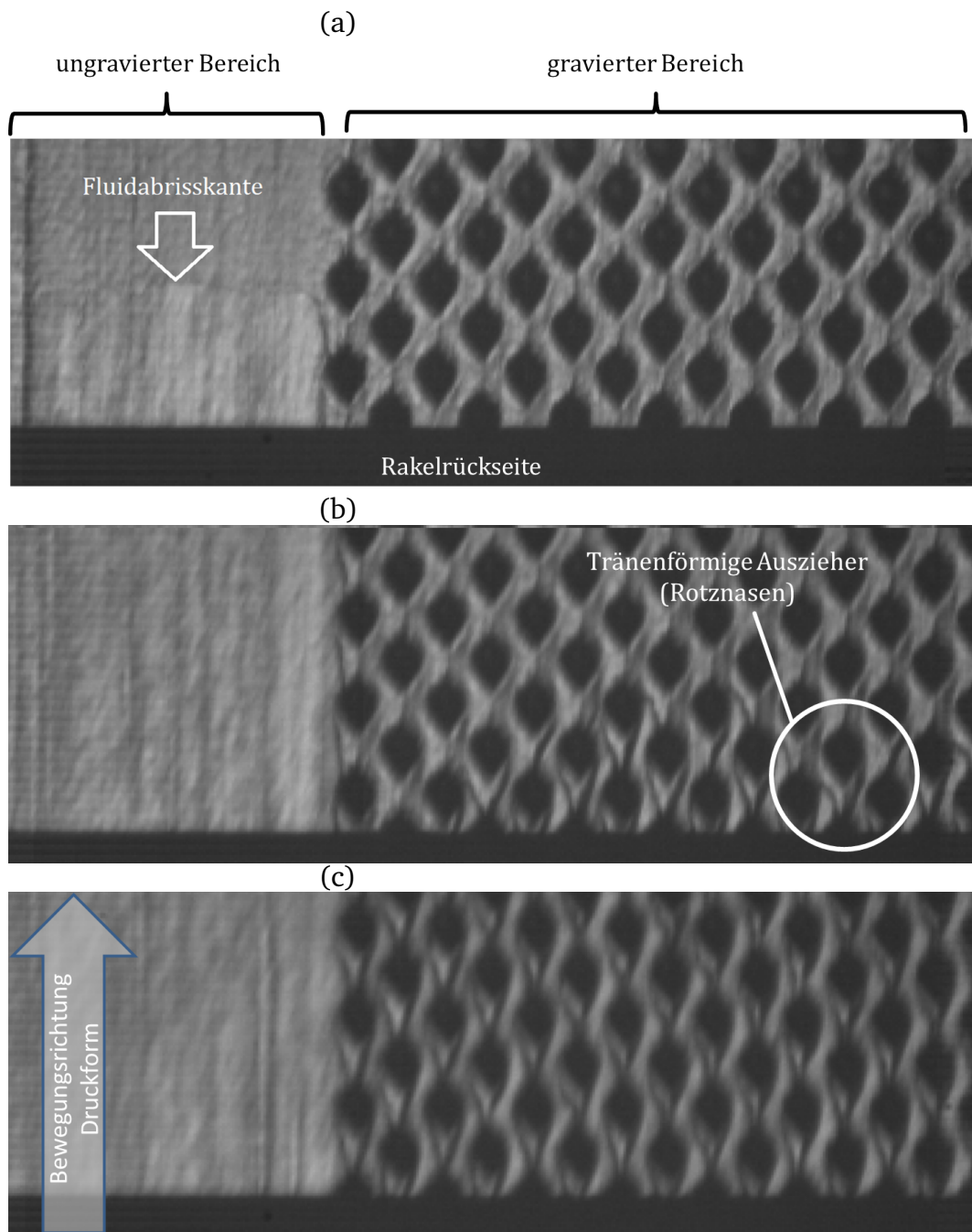
Wie in Kapitel 2.1.7 beschrieben, können im Tiefdruck-Rakelprozess sogenannte *Rotznasen* entstehen. Dies wurde auch in einigen Experimenten beobachtet. Hierzu werden Auszüge von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen präsentiert, die das Anfahren und Beschleunigen einer Labortiefdruckmaschine zeigen. Abbildung 57 zeigt exemplarisch drei Bildauszüge (a), (b) und (c), auf denen die Oberfläche einer Druckform mit gravierten und ungravierten Bereichen zu sehen ist. Am unteren Rand des jeweiligen Bildauszugs ist die Rakelrückseite als schwarzer horizontaler Balken zu erkennen. Im linken Teil der Bildauszüge ist der ungravierte Bereich, im rechten Teil der gravierte Bereich zu erkennen. Für die Durchführung des Experiments wurde eine Rakel an den Druckformzylinder angestellt und die Druckmaschine angefahren (Experimentanordnung **M1**). Als Rakel wurde eine Standard-Lamellenrakel verwendet, die mit Rakelwinkel  $\theta = 65^\circ$  angestellt wurde. Als Fluid wurde in diesem Experiment reines Glycerin (Viskosität  $\eta \approx 1400$  mPas) verwendet.

Der Bildauszug (a) zeigt einen fast stehenden Druckformzylinder, der in der frühen Anfangsphase der Beschleunigung ist. Im linken Teil ist eine Art Fluidabrissskante (weißer Pfeil) zu erkennen, die jene Stelle markiert, an welche die Rakel an den stehenden Druckformzylinder angestellt wurde.

Der Bildauszug (b) zeigt eine Momentaufnahme des weiter beschleunigenden Druckformzylinders. Der Bildauszug zeigt den Moment, an dem der Druckformzylinder eine Grenzggeschwindigkeit überschreitet, bei dem ein Effekt auftritt, der als *Rotznasen-Effekt* bezeichnet wird (vgl. Kapitel 2.1.7). Im unteren Bereich des Bildausschnitts sind tränenförmige Auszieher unterhalb der Gravuren zu erkennen. Hier wird das Fluid aus den Gravuren herausgezogen und es bilden sich Rotznasen. Die ungleichmäßige Graustufigkeit der in den ungravierten Bereichen hinter der Rakel ist durch einen ungleichmäßigen oder welligen Schmierfilm zu erklären.

Im Bildausschnitt (c) hat der Druckformzylinder eine noch höhere Geschwindigkeit (ca.  $2 \text{ ms}^{-1}$ ) erreicht. Es ist zu erkennen, dass der Rotznaseneffekt nicht vereinzelt, sondern bei allen Gravuren vorkommt.

Wird für Glycerin eine Oberflächenspannung von  $\approx 63,4$  mN/m angenommen, so ergibt sich für den Prozess, der als Auszug in (c) zu sehen ist, eine Kapillarzahl  $Ca \approx 44$ . Aus Abbildung 57 wird deutlich, dass es im Experiment eine Grenzggeschwindigkeit gibt, bei welcher der Effekt auftritt und trotz steigender Kapillarzahl im Prozess aufrecht erhalten bleibt. Dies steht auf den ersten Blick im Widerspruch zur Literatur, da dort vorhergesagt wurde, dass das Verschwinden der Rotznasen oberhalb einer bestimmten Kapillarzahl  $Ca \approx 1$  zu beobachten sei (vgl. Kitsomboonloha u. a. (2012)).



**Abbildung 57:** Drei Aufnahmen einer Tiefdruckform direkt nach dem Ausrakeln. Der schwarze Balken im unteren Teil des jeweiligen Bildes ist die Rakelrückseite. (a) Druckform fährt an, die Geschwindigkeit ist  $\approx 0 \text{ ms}^{-1}$ ; (b) Druckgeschwindigkeit erreicht einen Wert, bei dem Rotznasen beginnen sichtbar zu werden; (c) Bei noch höheren Geschwindigkeiten tritt der Rotznaseneffekt (rot) immer auf.

---

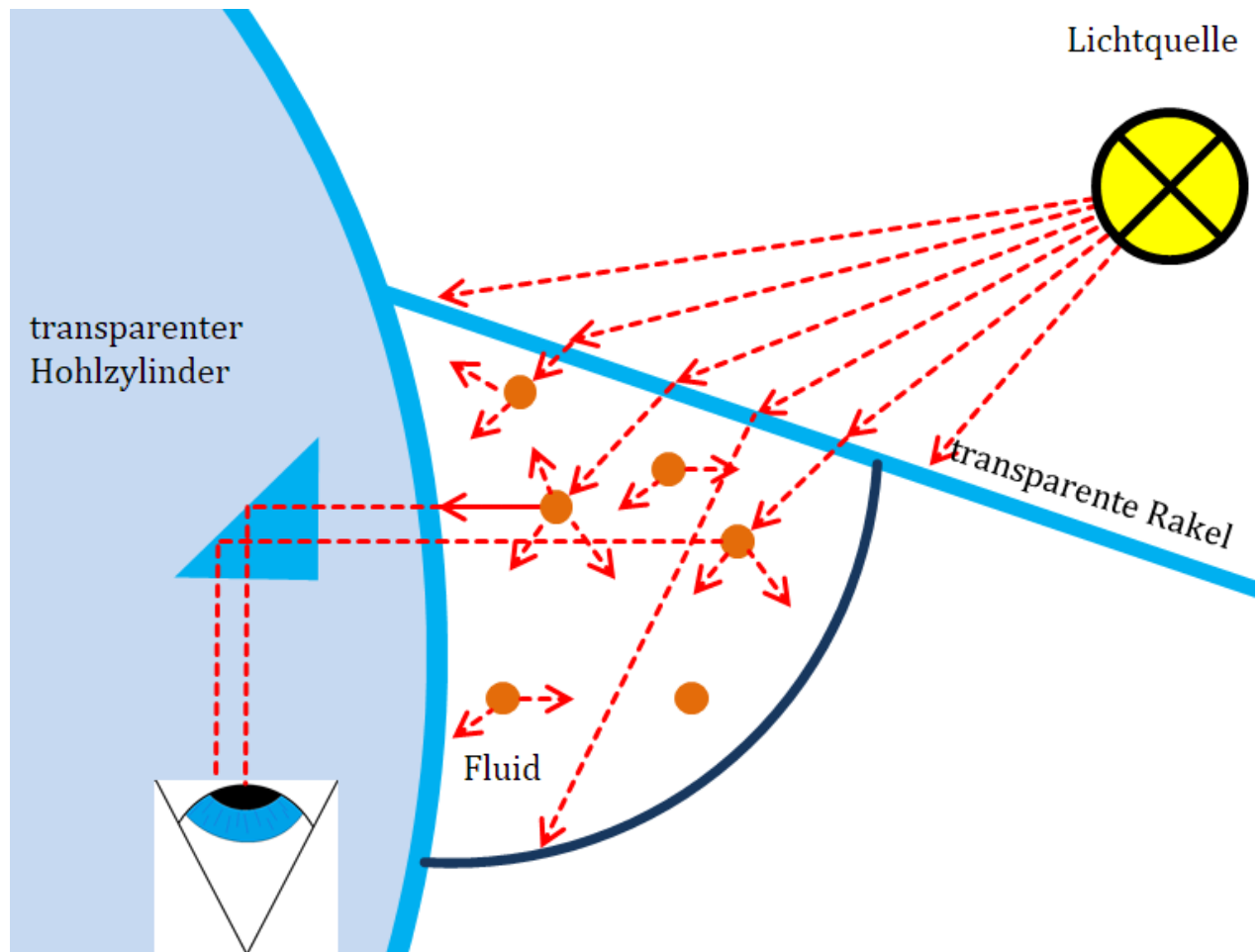
## 4.6 Zusätzliche Beobachtungen mit transparentem Hohlzylinder

---

Es wurde ein Rakelmessstand gebaut, der verschiedenen optische Perspektiven zur Beobachtung des Rakelprozesses ermöglicht. In Abschnitt 3.1.3 wurde der transparente Hohlzylinder und sein Aufbau behandelt. In dem folgenden Abschnitt werden Beobachtungen präsentiert, die bei der Arbeit mit transparentem Hohlzylinder gemacht werden können. Um das Stromlinienfeld innerhalb des Fluidmeniskus sichtbar zu machen, kann der in Abschnitt 3.1.3 beschriebene transparente Hohlzylinder verwendet werden, da er einen Blick in das Innere des Fluidmeniskus ermöglicht. Durch die Zugabe von Lichtstreuenden Partikeln sollte das Stromlinienfeld theoretisch durch eine Dunkelfeldmethode aufgeklärt werden können. Die im Folgenden vorgestellten Beobachtungen sollen zeigen, dass die in Abschnitt 3.3.1 auf Seite 55 beschriebenen Methoden durchführbar sind und einen Ausblick für weitere Untersuchungen liefern.

### **Dunkelfeldmethode am Fluid unter der Rakel**

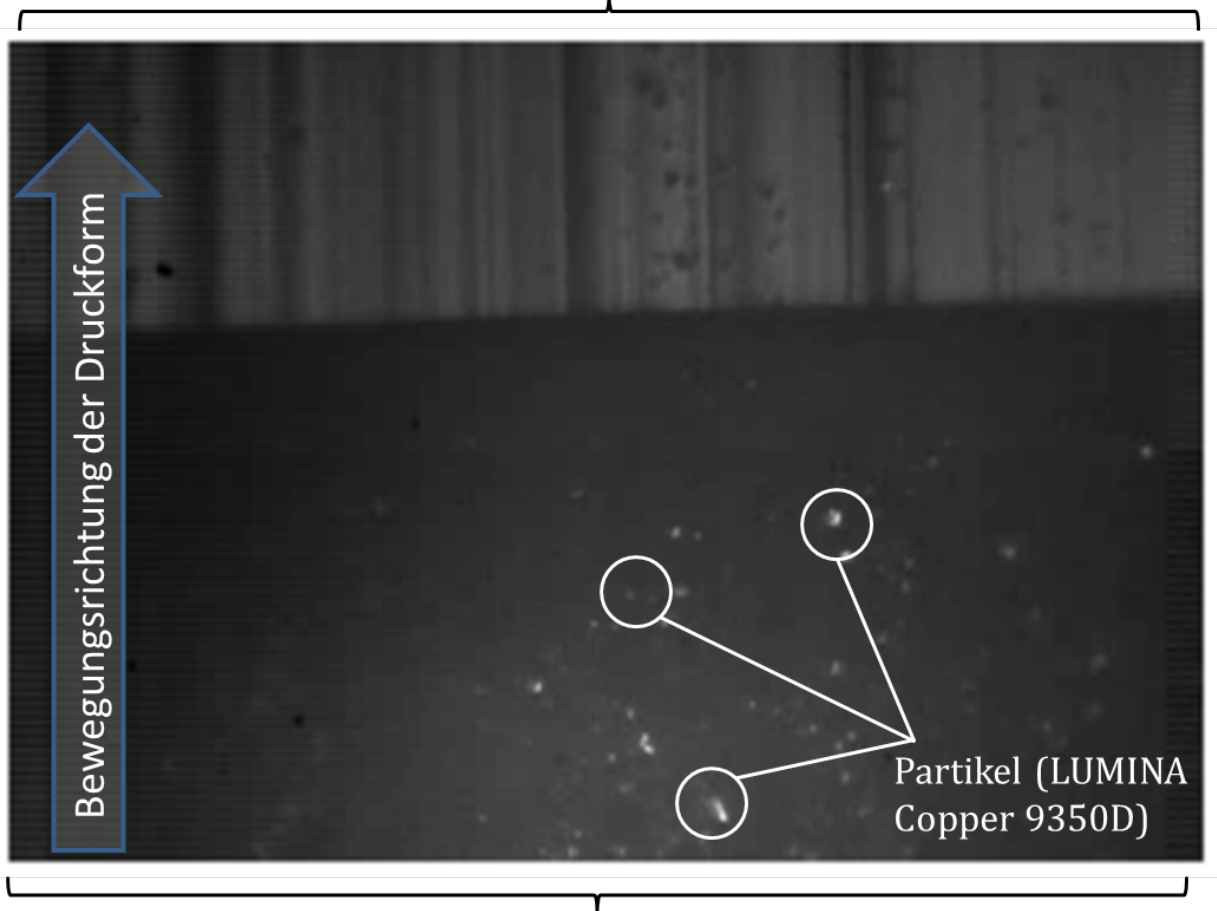
In **T2** sind transparenter Hohlzylinder, transparente Rakel, Kamera und Lichtquelle so angeordnet, dass alle vier Komponenten in einer optischen Achse liegen (vgl. Tabelle 8 auf Seite 56). Die Lichtquelle wird so angeordnet, dass das emittierte Licht durch die verwendete Rakel, dann durch den Zylindermantel und schließlich in die Kamera fällt. Da das verwendete Silikonöl eine höhere optische Dichte als Luft aufweist und es sich um verwinkelte und gekrümmte optische Grenzflächen handelt, durch die der optische Strahlengang verläuft, wird das von der Lichtquelle ausgehende Licht so gebrochen, dass kaum oder kein Licht in die Hochgeschwindigkeitskamera fallen kann. Werden glänzende Partikel in das Fluid gegeben, so wird das einfallende Licht an ihnen so gestreut, dass sie mit der Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet werden können. Werden sehr kleine Partikel mit niedriger Dichte verwendet, so bewegen sie sich entlang der Stromlinien im Strömungsfeld des Fluidmeniskus und machen das Stromlinienfeld sichtbar ohne es stark zu beeinflussen. In Abbildung 58 ist dieses Prinzip schematisch dargestellt.



**Abbildung 58:** Skizze der Funktionsweise der Dunkelfeldmethode am Rakelprozess.

In Abbildung 59 ist ein Auszug aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme von der beschriebenen Dunkelfeldmethode in Experimentanordnung **T2** zu sehen. Verwendet wurden Pigmente LUMINA Copper 9350D (Durchmesser  $\approx (8 - 48) \mu\text{m}$ ) des Herstellers BASF und als Fluid Silikonöl (Viskosität  $\eta = 100 \text{ mPas}$ ). Da es sich um einen Machbarkeitstest handelte, wurde eine beliebige Partikelkonzentration verwendet. Im unteren Bereich von Abbildung 59 ist ein dunkler Bereich mit hellen Punkten zu sehen. Der dunkle Bereich entspricht dem Fluidmeniskus, der das Licht der Lichtquelle so bricht, dass nur Licht in die Kamera fällt, das von den verwendeten Partikeln gestreut wird. Im oberen Bereich von Abbildung 59 sind vertikale Streifen zu sehen. Diese sind auf Fluidstreifen unterschiedlicher Dicke auf dem transparenten Hohlzylinder zurückzuführen. Diese brechen das einfallende Licht ebenfalls so, dass sie je nach Dicke und Form unterschiedlich viel Licht in die Hochgeschwindigkeitskamera lenken. Dunkle Punkte in diesem Bereich entstehen durch Partikel, die unter der Rakel hindurch gedrückt wurden und sich auf der Oberfläche des Zylindermantels abgesetzt haben. Es ist also zu beobachten, dass ein Fluidfilm auf dem transparenten Hohlzylinder zurückbleibt, der mit bloßem Auge nicht zu erkennen ist und dass diese Fluidfilm eine gewisse Unregelmäßigkeit in seiner Dicke aufweist.

## Fluidstreifen und Schmierfilm hinter der Rakel auf transparentem Hohlzylinder



## Fluidmensikus unter der Rakel

**Abbildung 59:** Auszug einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme einer durchgeführten Dunkelfeldmethode am Rakelmessstand mit Experimentanordnung **T2** bei einer Rakelgeschwindigkeit von  $v = 0,23 \text{ ms}^{-1}$ . Als Fluid wurde Silikonöl mit einer Viskosität  $\eta = 100 \text{ mPas}$  verwendet. Als Partikel wurden LUMINA Copper 9350D (Durchmesser  $\approx (8 - 48) \mu\text{m}$ ) verwendet.

Mit Aufnahmen aus verschiedenen Perspektiven und der Anwendung einer automatischen Micro-Particle-Tracking-Velocimetry ( $\mu\text{PTV}$ ) lassen sich auf diese Weise die dreidimensionalen Trajektorien erfassen und untersuchen. Solche Methoden wurden bereits in anderen Arbeiten angewendet und näher beschrieben (vgl. Tönsmann u. a. (2019)).



---

## 5 Diskussion der Ergebnisse

---

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Untersuchungen und die daraus entstandenen Ergebnisse diskutiert und abschließend bewertet. In Kapitel 1 wird die vorliegende Arbeit zu Experimenten zum Benetzungsverhalten am Beispiel des Rakelprozesses dadurch motiviert, dass der Rakelprozess in vielen technischen Prozessen von großer Bedeutung, jedoch kaum hinreichend verstanden ist. Aus dieser Motivation wird die wissenschaftliche Fragestellung abgeleitet, mit welchem Modell eine Rakel im Tiefdruck beschrieben werden kann. In Kapitel 2.1.3 wird in diesem Zusammenhang ein mechanisches Rakelmodell aufgestellt und wichtige Begrifflichkeiten zur Beschreibung der Rakel und des Rakelprozesses im Tiefdruck definiert. Um die wissenschaftliche Fragestellung nach den Besonderheiten des Rakelprozesses im Tiefdruck und wie er von anderen Rakelprozessen abgegrenzt werden kann, soll in diesem Abschnitt zunächst diskutiert werden.

### **Diskussion zur Einordnung des Rakelprozesses im Tiefdruck und seine Abgrenzung zu anderen Bereichen:**

Im Tiefdruck-Rakelprozess entsteht an der Rakel ein stabiles Gleichgewicht aus Staudruck, Anpresskraft, Reibungskräften, welches zu einem quasistatischen Zustand führt. Dieser führt immer zu einem optimalen Abstreifen nichtdruckender Druckformflächen und dem Befüllen der Gravur. Ein dünner Schmierfilm soll einen verschleißminderten Effekt haben und zugleich den Druckprozess nicht negativ beeinflussen. Besonders in der gedruckten Elektronik soll dieser Schmierfilm so dünn wie möglich sein, aber dennoch für minimalen Verschleiß der Druckform und der Rakel sorgen. (vgl. Tjiptowidjojo, Hariprasad, Schunk (2018), Subramanian (2008), Kitsomboonloha u. a. (2012), Hariprasad u. a. (2016)) In der Literatur werden meistens unter dem Begriff der Rakel verschiedene Werkzeuge für unterschiedliche Funktionen verstanden. Das mechanische Rakelmodell der Tiefdruck-Rakel basiert auf der Annahme, dass sich die Tiefdruck-Rakel von anderen Rakelarten in anderen technischen Bereichen oder Bereichen des Druckens abgrenzt und versucht ihre Gemeinsamkeiten innerhalb der Gruppe der Tiefdruck-Rakel zusammenzufassen. Im Siebdruck erfüllt die Rakel (meist aus Elastomermaterial) die Funktion hochviskose Siebdruckfarbe durch das Drucksieb zu drücken. Im Flexodruck wird eine Rasterwalze mit einem Kammerrakelsystem eingefärbt, was mit dem Tiefdruck auf Grund unterschiedlicher Materialien und Aufbau des Druckprozesses kaum verglichen werden kann. Oft wird versucht aus dem Rakelbeschichtungsprozess Erkenntnisse über den Rakelprozess im Tiefdruck zu gewinnen. (vgl. Kitsomboonloha u. a. (2012), Schneider, Traut, Hamburger (2014), Park, Shin, Lee (2016), Tjiptowidjojo, Hariprasad, Schunk (2018)) Der wesentliche Unterschied zwischen Rakelbeschichtung und Rakeltiefdruck liegt darin, dass im Rakelbeschichtungsprozess

---

ein deutlich größerer Rakelkanal bereits voreingestellt wird und sich der Rakelkanal im Tiefdruck durch die physikalischen Gegebenheiten dynamisch bildet. Somit ergeben sich im Bereich des Rakeltiefdrucks eigene Randbedingungen für ein Modell und diese wird in der eigenen Modellbildung zu berücksichtigt. Damit grenzt sich die vorliegende Arbeit von vielen Arbeiten in ähnlichen Forschungsbereichen ab, da in diesen Arbeiten nicht klar ist im welchem Kontext und für welchen Zweck, also auch die Art und Weise seiner Durchführung, vom Rakelprozess gesprochen wird. Dies wird auch daran deutlich, dass keine einheitliche Nomenklatur zur Beschreibung des Rakelprozesses existiert. Dies lässt sich an zahlreichen Literaturquellen zeigen. Das eigene Rakelmodell beschreibt die Physik des Rakelprozesses nicht vollständig, jedoch legt es die Geometrie und die Beschreibung einer Rakel, sowie eine einheitliche Sprache fest.

### **Diskussion der Experimente**

Die wissenschaftliche Fragestellung in Abschnitt 1.3 bezieht sich darauf, ob und auf welche Haupteinflussgrößen der Rakelprozess reduziert werden kann. Hierbei werden vor allem der Einfluss der Rakelanpresskraft, der Einfluss der Fluidviskosität, der Einfluss der Gravuren einer Druckform selber und der Kapillarzahl auf den Rakelprozess untersucht. Es wird untersucht wie sich ein Tropfen mit bestimmtem Volumen unter gewissen Bedingungen unter der Rakel verteilt, wenn er durch die äußeren Zwangsbedingungen des Rakelprozesses auf einer Druckform abgerakelt wird. Die Tropfenbreite von Fluidtropfen unter der Rakel kann durch die Breite des hinter der Rakel entstandenen Schmierfilms bestimmt werden. Allgemein zusammengefasst kann keiner der untersuchten Parameter als entscheidende Einflussgröße identifiziert werden. In Abschnitt 2.4 sind Forschungsarbeiten präsentiert, die sich mit verschiedenen Methoden ähnlichen Fragestellungen befassen und zum Teil zu widersprüchlichen Ergebnissen führen. Dies soll in den folgenden Unterpunkten näher diskutiert werden. Eine Frage, die sich in diesem Zusammenhang stellt, ist, ob die entstandenen Ergebnisse miteinander verglichen werden können, da sie mit unterschiedlichsten Methoden und Werkzeugen produziert wurden und daher somit als Ergebnisse des jeweiligen untersuchten Laborsystems betrachtet werden müssen. Beispielsweise gibt es unterschiedliche Vorhersagen über den *optimalen* Rakelwinkel, ohne dass näher erläutert wird, was darunter zu verstehen ist (vgl. Scheuter, Bognar (1968) und Jeon, Kim, Kim (2017)).

Einfluss der Fluidviskosität auf die Tropfenbreite unter der Rakel:

In Abschnitt 3.4.3 wurden Fluidtröpfchen unterschiedlicher Viskosität bei verschiedenen Rakelgeschwindigkeiten auf ungravierten Bereichen der Druckform abgerakelt. Dabei wird beobachtet, dass sich die Tropfenbreite entlang des Rakelwegs näherungsweise logarithmisch verbreitert. Bohan, Claypole, Gethin (2000) befassten sich in ihren Untersuchungen ebenfalls mit der Untersuchung zum Einfluss der Fluidviskosität, jedoch verwendeten sie Fluide mit unbekannten

---

rheologischen Eigenschaften und regulierten eine genäherte Viskosität mit der Zugabe von organischen Lösemitteln nach und untersuchten das Ergebnis nach dem Abdrucken (vgl. Bohan, Claypole, Gethin (2000)). Die vorliegende Arbeit verwendet ein einfaches newtonsches Fluidsystem (Silikonöl), dessen rheologische Eigenschaften vor der Verwendung zunächst untersucht werden, sodass die Viskosität und Oberflächenspannung angepasst werden können. Dies ist für die Erforschung des Rakelprozesses von hoher Relevanz.

Aus den Ergebnissen (s. Abschnitt 4.3) lässt sich ableiten, dass die Fluidviskosität als Haupteinflussgröße für das Fluidverhalten unter der Rakel nicht geeignet ist, da kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden konnte.

#### Einfluss der Rakelanpresskraft auf die Tropfenbreite unter der Rakel:

Bei den Untersuchungen zur Rakelanpresskraft wird die Ausbildung der Kontaktzone untersucht. Ein direkter Einfluss auf die Tropfenbreite wird mangels passendem Equipment nicht untersucht. Es wird beobachtet, dass die Rakelanpresskraft einen Einfluss auf den Verschleiß von Rakel und Druckform, sowie die Ausbildung des effektiven Rakelwinkels hat. Es wird eine Methode entwickelt, um den Einfluss der Rakelanpresskraft auf die Ausbildung der Kontaktzone zu untersuchen. Laut Jeon et al. beeinflusst die Rakelanpresskraft die Schmierfilmdicke, was in den eigenen Untersuchungen nicht überprüft werden kann (vgl. Jeon, Kim, Kim (2017); Hoang, Ko (2015)). Es wird in den Untersuchungen beobachtet, dass sich die Rakelfase bei der Ausbildung der Kontaktzone nicht allein durch plastische Materialverformung auf Grund von fluidmechanischen Drücken ausbildet, sondern ein Materialabrieb ebenfalls stattfindet. In der Literatur wird das Verhältnis von Kontaktzonenbreite zu Gravurparametern auf die Schmierfilmdicke untersucht, jedoch ist die mechanische Ausbildung der Kontaktzone nicht weiter hinterfragt (vgl. Hoang, Ko (2015)). Andere Arbeiten behandeln den Einfluss der mechanischen Reibung zwischen Rakel und Druckform auf das Druckergebnis untersucht (vgl. Lu, Zhang, Li (2013)). Es werden Metallpartikel auf der Druckform nach dem Rakeln entdeckt, die als Bestandteile der verwendeten Rakelmesser identifiziert werden können. Hinzu kommt, dass die beobachteten Abriebpartikel korrodieren können, was bedeutet, dass während des Rakelprozesses auch elektrochemische Prozesse stattfinden können. Dies bedeutet vor allem für den Einsatz des Tiefdrucks in der gedruckten Elektronik eine Herausforderung, da das Einbringen von metallischen Fremdkörpern mit magnetischen und korrosiven Eigenschaften höchst problematisch ist. Da in der gedruckten Elektronik Elektronen-Transportmechanismen von großer Bedeutung sind (vgl. Nisato, Lupo, Ganz (2016)), sollte diese Beobachtung im Bereich der gedruckten Elektronik berücksichtigt werden.

#### Einfluss der Gravur auf die Tropfenbreite unter der Rakel:

Es wurde der Einfluss der Gravurparameter auf die Breite von Fluidtropfen auf der Druckform bei zwei verschiedenen Tonwerten durch die Rakel untersucht. Die Experimente zum Einfluss der Gravur auf die Tropfenbreite haben ergeben, dass sich das Fluid auf gravierten Bereichen der Druckform schneller verbreitern kann, als auf glatten ungravierten Bereichen. Vermutlich wirken die Gravuren wie Durchflusskanäle, die unter dem Einfluss des Staudrucks zu einer schnelleren Verteilung des Fluids unter der Rakel führen. Allerdings konnte zwischen den unterschiedlich gravierten Bereichen untereinander kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Aus der Literatur sind kaum solche oder ähnliche Untersuchung bekannt. Kitsomboonloha et al. haben in ihren Untersuchung zwar mit unterschiedlichen Gravuren in geätzten Siliziumwafern experimentiert, was die Vergleichbarkeit der Messergebnisse kaum zulässt (vgl. Kitsomboonloha u. a. (2012)). Hoang und Ko haben in ihr Modell zur Befüllung der Druckform Überlegungen zum Verhältnis aus Breite der Vertiefungen der Gravuren und Kontaktzonenbreite miteinbezogen (vgl. Hoang, Ko (2015)). Da in den eigenen Experimenten mit Rakeln mit einer Lamellendicke gearbeitet wurde, die in der Größenordnung der Breite der Gravuren lag, wäre die Rakel laut Hoang und Ko für die optimale Befüllung, also keine Unter-, bzw. Überfüllung der Gravuren geeignet. Die Aussage konnte nicht abschließend überprüft werden.

#### Einfluss der Kapillarzahl auf die Tropfenbreite unter der Rakel:

In der Literatur wurde erwähnt, dass Materialparameter wie Grenzflächenenergien und Oberflächenrauigkeiten unter bestimmten Bedingungen eine Auswirkung auf den Rakelprozess haben könnten, was jedoch nicht weiter untersucht wurde. Da die Kapillarzahl  $Ca$  in der Literatur oft als entscheidende dimensionslose Größe zur Beschreibung des Rakelprozesses herangezogen wird und die Grenzflächenspannung  $\sigma$  in Gleichung 19 auf Seite 29 im Nenner steht, haben auch die verwendeten Fluide und ihre Oberflächenspannungen einen Einfluss auf die Kapillarzahl. Dies wird in keiner der in Abschnitt 2.4 zitierten Arbeiten untersucht. In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Grenzflächenspannung ebenfalls nicht untersucht, jedoch wurden für die Experimente Fluide verwendet, deren Oberflächenspannung alle im Rahmen von  $(20 \pm 2)$  mN/m lagen, also kaum variierten. Dies war bei den verwendeten Fluiden (Silikonöle unterschiedlicher Viskosität) für die Durchführung der Experimente von Vorteil, da über die Einstellung der Viskosität und der Rakelgeschwindigkeit die Kapillarzahl für jedes Experiment genau vorhergesagt werden konnte. Kitsomboonloha et al. sagen das Verschwinden des Rotz-naseneffekts oberhalb einer bestimmten Kapillarzahl und der Verwendung Rakelmessern mit Rakelbeschichtungen niedriger Oberflächenenergie vorher (vgl. Kitsomboonloha u. a. (2012)). Beides konnte nicht bestätigt werden. Die eigenen Arbeiten wurden mit newtonschen Fluiden und Lamellenrakeln aus Standardstahl durchgeführt, was in manchen Publikationen nicht der Fall ist und so die Kapillarzahl als Einflussgröße nur schwer für einen bestimmten Prozess ermittelt werden kann (vgl. Bohan, Claypole, Gethin (2000), Kitsomboonloha u. a. (2012), Kitsom-

---

boonloha, Subramanian (2014)). Da die Scherrate im Rakelprozess nicht eindeutig bestimmt werden kann, ist eine genaue Aussage über die Fluidviskosität und die Kapillarzahl des Prozesses nicht möglich. Die Autoren gehen daher den Weg, dass sie die Viskosität nicht-newtonscher Fluide innerhalb eines Rakelprozesses genähert annehmen. Zum Einfluss der Kapillarzahl ist die eigene Arbeit daher aussagekräftiger, da die Kapillarzahlen für die untersuchten Prozesse eindeutig ermittelt wurde. Die Kapillarzahl konnte nicht als entscheidende dimensionslose Größe zur Beschreibung des Rakelprozesses identifiziert werden.

### **Diskussion der eigenen Vorgehensweise:**

Ein neuartiger Rakelmessstand ist erforderlich, um die Durchführung von Experimenten unter den Randbedingungen des aufgestellten Rakelmodells zu gewährleisten. Der Rakelmessstand ermöglicht die Verwendung von unterschiedlichen Druckformen und Rakelmessern und erlaubt Randbedingungen wie sie im Tiefdruck existieren. Es gibt bereits Arbeiten, die den Rakelprozess zwar ebenfalls mit einer Hochgeschwindigkeitskamera untersuchen, jedoch die Randbedingungen des Tiefdrucks vernachlässigen, da z.B. keine realen Druckformen und Rakelgeschwindigkeiten angewendet werden können (vgl. Hu, Subramanian, Liu (2018)). Es können aus unterschiedlichen Perspektiven Aufnahmen gemacht werden und es wurden Experimentkategorien entwickelt, die die optische Beobachtung des Rakelprozesses mit transparenten Bauteilen (transparente Rakel, transparenter Hohlzylinder zur zentralperspektivischen Erfassung) erlauben (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Es wird mit Hilfe des Rakelmessstands und der Hochgeschwindigkeitskamera eine Methode entwickelt und angewendet, mit der die Tropfenbreite unter der Rakel erfasst und quantitativ ausgewertet werden kann. Dabei wird die Tropfenbreite über dem Rakelweg aufgetragen und es wird angenommen, dass sie sich in halblogarithmischer Darstellung linear verhält. In den Abbildungen 40 und 42 ist zu erkennen, dass sich die Tropfen bei verschiedenen Rakelgeschwindigkeiten unterschiedlich stark verbreitern, also die ermittelte Steigungen in halblogarithmischer Darstellung stark voneinander unterscheiden. Dies ist möglicherweise auf mangelnde Reproduktion der Experimentparameter zurückzuführen. Die aufgetragenen Datenpunkte streuen und die Ausgleichsrechnungen liefern nicht bei allen Datensätzen die selbe Ergebnisqualität. Leicht unterschiedliche Rakeleinstellungen, Verschmutzungen oder Abriebpartikel, die sich an der Rakel sammeln, können die unterschiedlichen Ergebnisse ebenfalls erklären. Außerdem wird die Tatsache vernachlässigt, dass ein Tropfen unter der Rakel mit zunehmenden Rakelweg an Volumen verliert, sodass die Annahme der logarithmisch zunehmenden Tropfenbreite nur näherungsweise für einen kleinen Rakelweg gelten kann. Mit Hilfe von Experimenten mit größeren zurückgelegten Rakelwegen und größeren Datensätzen kann die Annahme auf Gültigkeit untersucht werden.

In Kapitel 4 wird gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist das Strömungsfeld im Fluidmeniskus und den Schmierfilm hinter der Rakel mit kontrastbildenden Techniken sichtbar zu machen. Da

---

sowohl die Strömung im Fluidmeniskus vor der Rakel (vgl. Moffatt (1963), Strauß (1975)), als auch der Schmierfilm hinter der Rakel (vgl. Hanumanthu (1999), Hariprasad u. a. (2016), Kitsomboonloha u. a. (2012)) bereits häufiger Bestandteil wissenschaftlicher Untersuchungen waren, könnte diese Methode einen Beitrag zur Erforschung der Physik des Rakelprozesses darstellen. Mit dem Rakelmessstand konnten einige der typischen, in Abschnitt 4 beschriebenen Effekte des Rakelprozesses beobachtet und reproduziert werden. Dies ist ein Indiz dafür, dass der Rakelprozess mit dem Rakelmessstand realitätsgetreu nachgestellt werden kann. Der Einsatz einer transparenten Rakel funktioniert prinzipiell, jedoch ist nicht geklärt worden ob sich eine transparente Rakel aus PEN mit einer konventionellen Stahlrakel vergleichen lässt. Da beide Rakel auf Grund ihrer Materialbeschaffenheit unterschiedliche Elastizitätsmodule besitzen, könnte sich der Rakelprozess grundlegend unterscheiden, da die Kräftebetrachtungen an beiden Rakeln verschieden sein sollten. Die zentralperspektivische Erfassung des Rakelprozesses mit Hilfe eines transparenten Hohlzylinders ist möglich und bietet gänzlich neue experimentelle Ansätze. Zum experimentellen eigenen Vorgehen bleibt zu ergänzen, dass noch weitere Einflussgrößen grundsätzlich für weitere Untersuchungen in Betracht gezogen werden sollten. Es existieren mit der Entwicklung des Rakelmessstands und den dazugehörigen Experimentkategorien viele experimentelle Möglichkeiten, die auch dazu verwendet werden können, mit numerischen Methoden kombiniert zu werden, wie das Tjiptowidjojo, Hariprasad, Schunk (2018) durchgeführt haben (vgl. Bitsch u. a. (2019a)).

---

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

Der Tiefdruck als eines der schnellsten Druckverfahren, mit der höchsten Reproduzierbarkeit, lässt sich in fünf Teilprozesse aufspalten. Der Rakelprozess ist einer davon. Durch das Abstreifen von Fluid von der Oberfläche einer Druckform mit Hilfe einer Rakel, wird das verwendete Fluid stark geschert. Auf Grund der enormen Scherung des Fluids entstehen an der Rakel verschiedene, oft störende, Effekte deren physikalische Ursachen noch weitgehend ungeklärt sind. Diese Effekte können bislang nur durch Erfahrungen der Bediener beherrscht werden, da bis heute nicht geklärt ist, welche Bedingungen im Rakelprozess zu welchen Effekten führen. Es existieren unterschiedliche Arbeiten, die zur Aufklärung des Rakelprozesses beitragen. Die Arbeiten sind in ihren Aussagen und Methoden oft nicht konsistent. In den jeweiligen Arbeiten wird jeweils mit unterschiedlichen Materialien (Fluide, Druckformen etc.), sowie mit unterschiedlichen Methoden gearbeitet. Hierzu gehören Schichtdickenmessungen hinter der Rakel, Bestimmung des Übertragungsvolumens nach dem Abdrucken, numerische Simulationen, sowie mathematisch-analytische Untersuchungen zu diesem Thema.

In dieser Arbeit wird der Rakelprozess im Tiefdruck definiert und von anderen Rakelarten abgegrenzt. Hierzu wird ein mechanisches Rakelmodell aufgestellt und die Konstruktion eines Rakelmessstands zur Realisierung und Beobachtung sehr verschiedener Tiefdruck-Rakelprozesse vorgestellt. Der Rakelmessstand erlaubt verschiedene Experimentanordnungen bei denen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aus verschiedenen Perspektiven unterschiedliche Bereiche an der Rakel während des Prozesses beobachtet werden können. Neben konventionellen Rakelmessern und Druckformen, erlaubt der Rakelmessstand die Adaption einer transparenten Rakel, sowie eines transparenten Hohlzylinders. Dieses Zubehör erlaubt einen optischen Einblick in den Bereich zwischen der Rakel und der Druckform. Durch die Zugabe von Tracer-Partikeln in das Fluid, kann eine Dunkelfeldmethode an der Rakel angewendet werden und die Funktion und Machbarkeit wird präsentiert.

Es werden verschiedene Experimente, ihre Durchführung und Ergebnisse präsentiert. Es wird untersucht welche Auswirkungen die Rakelanpresskraft auf die Form der Rakelfase hat. Dabei wird zwischen dem Rakelwinkel  $\theta$  und dem effektiven Rakelwinkel  $\theta_{eff}$  differenziert und gezeigt, dass eine höhere Rakelanpresskraft zu einem kleineren  $\theta_{eff}$  führt und damit eine deutlich breitere Kontaktzone aufweist.

Es werden Silikonöltropfen mit unterschiedlicher Viskosität auf die Druckform gegeben und mit der Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet wie der abgerakelte Tropfen unter der Rakel breiter wird. Hierzu wird eine Auswertemethode zur quantitativen Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen präsentiert. Es wird untersucht wie stark neben der Fluidviskosität,



---

verschiedene Gravurparameter der Druckform und die Kapillarzahl des Prozesses sich auf die Tropfenbreite in Abhängigkeit des zurückgelegten Rakelwegs auswirken. Dabei wurde deutlich, dass keiner der genannten Parameter des Rakelprozesses den entscheidenden Einfluss auf den Rakelprozess hat.

#### Ausblick:

Die Arbeit hat gezeigt, dass in der Literatur experimentelle Untersuchungen zum Rakelprozess existieren, die Ergebnisse oft kaum miteinander zu vergleichen sind. Für weitere Untersuchungen und Experimente zum Rakelprozess sollte ein Prozessstandard entwickelt werden, der die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ermöglicht. Hierzu wird empfohlen den Rakelprozess einheitlich nach Einflussgrößen einzuteilen für alle untersuchten Einflussgrößen einheitliche Größenordnungsbereiche festzulegen. Hierzu müssen die entscheidenden Einflussgrößen zunächst definiert und eingegrenzt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde ausschließlich mit newtonschen Fluiden gearbeitet. Weitere Untersuchungen mit nicht-newtonschen Fluiden würden den Erkenntnisraum erweitern, da im Tiefdruck meistens nicht-newtonsche Fluide verwendet werden. Die eigenen Arbeiten wurden mit einem bestimmten Rakeltyp bei einem bestimmten Rakelwinkel und -anpresskraft durchgeführt. Auch an dieser Stelle sollte eine systematische Parameterstudie durchgeführt werden, die das Durchbiegeverhalten von Rakelmessern unterschiedlicher Materialien mit unterschiedlichen Anschliffen und Beschichtungen untersuchen. Die Arbeit hat gezeigt, dass es möglich ist mit optischen Methoden das Strömungsfeld an der Rakel aufzuklären. Für die Zukunft wird empfohlen eine  $\mu$ PTV-Methode (microscopic particle tracking velocimetry) mit dem Konzept des transparenten Hohlzylinders zu kombinieren. Letztendlich sollten für ein detaillierteres Verständnis des Rakelprozesses die Kompetenzen aus den Bereichen der Strömungsmechanik, der Kontaktmechanik, des Druckmaschinenbaus, der Statistik und Computational Engineering auf die wissenschaftlichen Fragestellungen zum Thema Rakelprozess im Tiefdruck und dem dazugehörigen Strömungs- und Benetzungsverhalten angewendet werden.



---

## Literaturverzeichnis

---

- Bitsch, T., Schäfer, J., Diehl, E., Sauer, H. M., Dörsam, E., Ulbrich, S., Ridgeway, C. (2019a). “An experimental and numerical cooperative research concept for doctor blading.” In: *46th International Research Conference of IARIGAI, Stuttgart, Germany, 15.-18. September 2019*, S. 68–74.
- Bitsch, T., Schäfer, J., Melsa, S., Dörsam, E., Ridgeway, C. (2019b). “Innovative experimental setup enables in situ investigation of doctor blading process.” In: *Advances in Printing and Media Technology, Stuttgart, IARIGAI, In: 46th International Research Conference of IARIGAI, Stuttgart, September 15-18*, S. 60–67.
- Bodenstein, C. (2020). *Untersuchung des Tampondrucks und dessen Kantengenauigkeit für die Anwendung in der gedruckten Elektronik*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren. DOI: 10.25534/tuprints-00011685.
- Bohan, M. F. J., Claypole, T. C., Gethin, D. T. (2000). “The effect of process parameters on product quality of rotogravure printing”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 214(3), pp. 205–219.
- Bornemann, N. (2014). *Characterization and Investigation of Large-Area, Ultra-Thin Gravure Printed Layers*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren.
- Chou, Y. T., Ko, Y. T., Yan, M. F. (1987). “Fluid Flow Model for Ceramic Tape Casting”. In: *J. Am. Ceram. SO* 70, S. 280–282.
- Deegan, R. D., Bakajin, O., Dupont, T. F., Huber, G., Nagel, S., Witten, T. (2000). “Contact line deposits in an evaporating drop”. In: *Physical Review E* 62.1, S. 756–765. ISSN: 1063-651X. DOI: 10.1103/PhysRevE.62.756.
- Deutsche Institut für Normung e. V. (o. D.). *DIN 16 528, Terms for photogravure printing; printing form and printing process*. Berlin.
- Gray, T. (2003). *Gravure - Process and Technology*. Rochester NY: Gravure Education Foundation and Gravure Ass. of America,

- 
- Griesheimer, S. (2013). *Farbspaltungsphänomene von Druckfarben strukturierten Oberflächen am Beispiel des Flexodrucks*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren.
- Hanumanthu, R. (1999). "Variation of gravure coating thickness during early stages of doctor blade wear". In: *AIChE Journal* 45.12, S. 2487–2494. ISSN: 00011541. DOI: 10.1002/aic.690451204.
- Hariprasad, D. S., Grau, G., Schunk, P. R., Tjiptowidjojo, K. (2016). "A computational model for doctoring fluid films in gravure printing". In: *Journal of Applied Physics* 119.13, S. 135303. ISSN: 0021-8979. DOI: 10.1063/1.4945030.
- Hoang, H. P., Ko, S. L. (2015). "Effect of doctoring on the performance of direct gravure printing for conductive microfine lines". In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 25.11, S. 115018. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/25/11/115018.
- Hu, Subramanian, Liu (2018). "Cell Geometry Impact on the Cell Filling Process in Gravure Printing for Printed Electronics". In: *Technical Report No. UCB/EECS*, S. 165.
- Jeon, S. W., Kim, C., Kim, C. H. (2017). "Control and measurement of doctoring angle at deformed state in doctoring apparatus for printed electronics". In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 18.5, S. 633–639. ISSN: 2005-4602. DOI: 10.1007/s12541-017-0076-6.
- Kim, H. J., Krane, M. J., Trumble, K. P., Bowman, K. J. (2006). "Analytical Fluid Flow Models for Tape Casting". In: *Journal of the American Ceramic Society* 0.0. ISSN: 0002-7820. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.01163.x.
- Kipphan, H. (2000). *Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783540669418.
- Kitsomboonloha, R., Morris, S. J. S., Rong, X., Subramanian, V. (2012). "Femtoliter-scale patterning by high-speed, highly scaled inverse gravure printing". In: *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 28.48, S. 16711–16723. ISSN: 1520-5827. DOI: \url{10.1021/la3037132}.
- Kitsomboonloha, R., Subramanian, V. (2014). "Lubrication-Related Residue as a Fundamental Process Scaling Limit to Gravure Printed Electronics". In: *Langmuir* 30.12, S. 3612–3624. ISSN: 0743-7463. DOI: 10.1021/la404938z.

- 
- Kumar, S. (2015). "Liquid Transfer in Printing Processes: Liquid Bridges with Moving Contact Lines". In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 47.1, S. 67–94. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010814-014620.
- Lilien, O. (1959). *Die Frühgeschichte des Tiefdrucks bis zur Jahrhundertwende*. Frankfurt a.M.: Schmidt.
- Lu, J., Zhang, G., Li, L. (2013). "Research on Friction between Gravure Roller and Scraping Blade". In: *Applied Mechanics and Materials* 469, S. 399–403. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.469.399.
- Lunnerfjord, A., Sundberg, R., Gaven, J. (2016). "Doctor or coater blade and method in connection with its manufacturing". Pat. EP 1 349 986 B2.
- Melsa, S. (2018). *Entwicklung eines Messstands zur Erfassung des Rakelprozesses im Tiefdruck*. Masterthesis, Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren.
- Meschede, D. (2006). *Gerthsen Physik*. 23. Aufl. ISBN: 978-3-540-25421-8.
- Meyer, S. (1994). *Tampondruck: Verfahren und Möglichkeiten*. 1. Aufl. Lübeck. ISBN: 3925402675.
- Miura, H., Yamamura, M. (2015). "Direct thickness measurement of doctor-bladed liquid film on gravure roll surface". In: *J. Coat. Technol. Res.* 12, S. 27–833.
- Moffatt, H. K. (1963). "Viscous and resistive eddies near a sharp corner". In: *Journal of Fluid Mechanics* 18(1), S. 1–18. DOI: 10.1017/S0022112064000015.
- Nienhaus, V. (2012). *Konstruktive Umsetzung und Auslegung von Antireb, Steuerung und Messtechnik für einen Prüfstand*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren.
- Nisato, G., Lupo, D., Ganz, S., Hrsg. (2016). *Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications*. 1. Aufl. Pan Stanford Publishing. ISBN: 978-981-4669-74-0. DOI: 10.1201/b20043.
- Ollech, B. (1993). *Tiefdruck- Lehrbuch der Druckindustrie*. Frankfurt a.M: Polygraph Verlag GmbH. ISBN: 3876411815.

- 
- Park, J., Shin, K., Lee, C. (2016). "Roll-to-Roll Coating Technology and Its Applications: A Review". In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 17.4, S. 537–550. ISSN: 2234-7593. DOI: 10.1007/s12541-016-0067-z.
- Pflüger, K. M. (2019). *Entwicklung eines transparenten Druckformzylinders zur Umsetzung eines optischen Messverfahrens*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren.
- PHOTRON (2009). *Photron FASTCAM Viewer 3 User's Manual*. Version 3.0 / Revision 1.06E. Tokyo: Photron Limited.
- Schäfer, J., Sauer, H. M., Roisman, I. V., Dörsam, E. (2019). "Ink splitting and singular flows in the gravure press." In: *ECIS 2019- 33rd Conference of the European Colloid and Interface Society* 8.-13. Sept. 2019, S. 237.
- Scheer, H. G. (2007). *Siebdruck-Handbuch*. Lübeck. ISBN: 9783925402999.
- Scheuter, K. R., Bognar, D. (1968). "Beitrag zum Rakelproblem: Darmstadt". In: *DRUCK-PRINT* 4, S. 293.
- Schneider, A., Traut, N., Hamburger, M. (2014). "Analysis and optimization of relevant parameters of blade coating and gravure printing processes for the fabrication of highly efficient organic solar cells". In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 126, S. 149–154. ISSN: 09270248. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.03.048.
- Strauß, K. (1975). "Modell der Strömung, die sich am Rakelmesser einer Beschichtungsanlage einstellt". In: *Rheol. Acta* 14, S. 1058–1065.
- Subramanian, V. (2008). "Gravure as an Industrially Viable Process for Printed Electronics". In: *Technical Report No. UCB/EECS-2008-70*.
- Teschner, H. (2017). *Druck- und Medientechnik. Informationen gestalten, produzieren, verarbeiten*. Konstanz: Paul Christiani GmbH & Co. KG. ISBN: 978-3-9586323-9-4.
- Theopold, A. (2014). *Charakterisierung von Flexodruckformen hinsichtlich der Eignung für die gedruckte Elektronik: Dissertation*. Norderstedt: Books on Demand. ISBN: 3735779638.
- Tjiptowidjojo, K., Hariprasad, D. S., Schunk, P. R. (2018). "Effect of blade-tip shape on the doctoring step in gravure printing processes". In: *Journal of Coatings Technology and Research* 15.5, S. 983–992. ISSN: 1547-0091. DOI: 10.1007/s11998-017-0029-0.

---

Tönsmann, M., Kröhl, F., Cavadini, P., Scharfer, P., Schabel, W. (2019). “Calibration Routine for Quantitative Three-Dimensional Flow Field Measurements in Drying Polymer Solutions Subject to Marangoni Convection”. In: *Colloids and Interfaces* 3.1, S. 39. ISSN: 2504-5377. DOI: 10.3390/colloids3010039.

## A Anhang

### A.1 Experimentelle Daten

#### A.1.1 Daten zur Variation der Fluidviskosität

**Tabelle 21:** Tropfenbreite bei  $\nu = 0,115 \text{ ms}^{-1}$  und der Experimentanordnung **M1** für Silikonöle mit einer Viskosität im Bereich von  $\eta = (10, 20 \dots 400, 800) \text{ mPas}$  (Daten in Abb. 39, S. 79)

Viskosität in mPas	10	20	50		100	200	400	800
Rakelweg in mm				Rakelweg in mm				
0,1880	0,9503	1,4151	1,2705	0,4572	1,1845	0,8312	1,1637	1,2884
0,3760	1,4461	1,9109	1,7249	0,9143	2,2027	1,5897	2,2027	1,8183
0,5640	1,7353	2,2207	2,2517	1,3715	2,7949	2,0364	2,6079	2,0988
0,7520	1,9315	2,5306	2,5926	1,8286	3,1482	2,3378	2,8676	2,3481
1,1279	2,4273	2,9748	2,7475	2,7430	3,5742	2,7222	3,2313	2,7430
1,5039	2,8611	3,1710	3,0057	3,6573	4,0105	3,1170	3,6157	3,0235
1,8799	3,1710	3,3363	3,1297	4,5716	4,2183	3,3144	3,8131	3,1897
2,2559	3,3259	3,4602	3,2123	5,4859	4,4158	3,4495	3,9586	3,3664
2,6318	3,5428	2,5306	3,1917	6,4002	4,5716	3,5326	4,1352	3,5430

**Tabelle 22:** Tropfenbreite bei  $\nu = 0,23 \text{ ms}^{-1}$  und der Experimentanordnung **M1** für Silikonöle mit einer Viskosität im Bereich von  $\eta = (10, 20 \dots 400, 800) \text{ mPas}$  (Daten in Abb. 41, S. 80)

Viskosität in mPas	10	20	50	100	200	400	800
Rakelweg in mm							
0,59136	2,05744	1,52768	2,00816	2,3408	1,74944	1,86032	1,61392
1,18272	2,4024	1,70016	2,39008	2,8952	1,98352	2,0328	1,87264
1,77408	2,55024	2,39008	2,59952	3,12928	2,13136	2,16832	2,08208
2,36544	2,63648	2,41472	2,72272	3,25248	2,24224	2,26688	2,24224
3,54816	2,80896	2,32848	2,87056	3,37568	2,35312	2,37776	2,48864
4,73088	2,87056	2,29152	2,93216	3,4496	2,43936	2,5256	2,66112
5,9136	2,98144	2,24224	2,98144	3,54816	2,50096	2,61184	2,78432
7,09632	3,00608	2,19296	3,04304	3,56048	2,51328	2,69808	2,8952
8,27904	3,08	2,13136	3,04304	3,59744	2,5256	2,74736	2,99376

---

## A.1.2 Daten zum Einfluss der Kapillarzahl

---

**Tabelle 23:** Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs für einen Prozess mit einer Kapillarzahl  $Ca_{12} = 0,288$ . (Experimentanordnung T1)  
(Daten in Abb. 51 auf S. 92)

Rakelweg in mm	50 mPas ( $0,115 \text{ ms}^{-1}$ )	100 mPas ( $0,058 \text{ ms}^{-1}$ )
0,0965	1,1133	0,6720
0,1931	1,4844	1,2336
0,2896	1,7351	1,6448
0,4827	1,8855	1,8354
0,6757	2,1764	2,1664
0,8688	2,4171	2,3168
1,0619	2,7381	2,4873

**Tabelle 24:** Tropfenbreite in Abhängigkeit des Rakelwegs für einen Prozess mit einer Kapillarzahl  $Ca_{34} = 2,304$ . (Experimentanordnung T1)  
(Daten in Abb. 52 auf S. 92)

Rakelweg in mm	200 mPas ( $0,23 \text{ ms}^{-1}$ )	400 mPas ( $0,115 \text{ ms}^{-1}$ )
0,0929	1,6168	1,0344
0,1858	2,0688	1,3055
0,2787	2,2997	1,6470
0,4645	2,4202	1,8880
0,6503	2,6713	2,1190
0,8360	2,7818	2,2897
1,0218	2,7918	2,4504

---



**Tabelle 25:** Tropfenbreite in mm für verschiedene Kapillarzahlen bei einer Viskosität von 100 mPas

Rakelweg in mm	$Ca_1 = 0,23$	$Ca_2 = 0,288$	$Ca_3 = 0,576$
0,0965	0,6720	0,6882	0,7023
0,1931	1,2336	1,2391	1,2411
0,2896	1,6448	1,6448	1,7098
0,4827	1,8354	1,8922	1,8647
0,6757	2,1664	2,0987	2,1584
0,8688	2,3168	2,3003	2,2984
1,0619	2,4873	2,4713	2,4746

**Tabelle 26:** Tropfenbreite in mm für verschiedene Kapillarzahlen bei einer Viskosität von 200 mPas

Rakelweg in mm	$Ca_1 = 0,576$	$Ca_2 = 1,15$	$Ca_3 = 2,3$
0,0929	0,6878	0,7044	1,6168
0,1858	1,2627	1,2683	2,0688
0,2787	1,6836	1,6836	2,2997
0,4645	1,8786	1,9368	2,4202
0,6503	2,2174	2,1482	2,6713
0,8360	2,3714	2,3545	2,7818
1,0218	2,5459	2,5295	2,7918

**Tabelle 27:** Tropfenbreite in mm für verschiedene Kapillarzahlen bei einer Viskosität von 400 mPas

Rakelweg in mm	$Ca_1 = 1,15$	$Ca_2 = 2,3$	$Ca_3 = 4,6$
0,0929	1,8099	1,0344	1,6999
0,1858	2,0359	1,3055	1,9248
0,2787	2,1514	1,6470	2,0397
0,4645	2,2116	1,8880	2,0996
0,6503	2,3372	2,1190	2,2245
0,8360	2,3924	2,2897	2,2795
1,0218	2,3974	2,4504	2,2845

**Tabelle 28:** Tropfenbreite in mm für verschiedene Kapillarzahlen bei einer Viskosität von 800 mPas

Rakelweg in mm	$Ca_1 = 2,3$	$Ca_2 = 4,6$	$Ca_3 = 9,2$
0,0965	0,7148	0,6845	0,7007
0,1931	1,2538	1,2463	1,2518
0,2896	1,7226	1,6576	1,6576
0,4827	1,8776	1,8483	1,9051
0,6757	2,1714	2,1793	2,1116
0,8688	2,3114	2,3298	2,3133
1,0619	2,4876	2,5004	2,4843

---

### A.1.3 Daten zum Einfluss der Gravurparameter

---

**Tabelle 29:** Einfluss der Gravur auf die Tropfenbreite in mm für  $\eta = 100 \text{ mPas}$  bei  $v = 0,23 \text{ ms}^{-1}$

Rakelweg in mm	80 % Tonwert	Rakelweg in mm	100 % Tonwert
0,1018	1,1503	0,1018	1,2724
0,2036	1,385	0,2036	1,6389
0,3054	1,7101	0,3054	2,0668
0,4072	2,0054	0,4072	2,2193
0,5090	2,1987	0,5090	2,3214
0,7125	2,5041	0,7125	2,576
0,9161	2,6778	0,9161	2,5051
1,1197	2,7894	1,1197	2,5967
1,3233	2,9522	1,3233	2,7592
1,5269	2,9731	1,5269	2,5862

**Tabelle 30:** Einfluss der Gravur auf die Tropfenbreite in mm für  $\eta = 200 \text{ mPas}$  bei  $v = 0,23 \text{ ms}^{-1}$

Rakelweg in mm	80 % Tonwert	Rakelweg in mm	100 % Tonwert
0,1036	0,9018	0,1023	1,2275
0,2073	1,4416	0,2046	1,5963
0,3109	1,6796	0,3069	1,9846
0,4146	1,8452	0,4092	2,2101
0,5182	2,0008	0,5115	2,445
0,7255	2,2081	0,7160	2,7006
0,9328	2,3842	0,9206	2,813
1,1401	2,4257	1,1252	2,9768
1,3474	2,5189	1,3298	3,0075
1,5547	2,6329	1,5344	3,0179

---

**Tabelle 31:** Einfluss der Gravur auf die Tropfenbreite in mm für  $\eta = 400 \text{ mPas}$  bei  $v = 0,23 \text{ ms}^{-1}$

Rakelweg in mm	80 % Tonwert	Rakelweg in mm	100 % Tonwert
0,1042	1,2192	0,1025	1,0453
0,2083	1,5009	0,2049	1,3832
0,3125	1,7922	0,3074	1,6189
0,4167	2,0527	0,4098	1,7931
0,5208	2,1881	0,5123	1,9064
0,7292	2,3856	0,7172	2,152
0,9375	2,5419	0,9221	2,3773
1,1458	2,6148	1,1270	2,5104
1,3542	2,7087	1,3319	2,5217
1,5625	2,7503	1,5368	2,5441

**Tabelle 32:** Einfluss der Gravur auf die Tropfenbreite in mm für  $\eta = 800 \text{ mPas}$  bei  $v = 0,23 \text{ ms}^{-1}$

Rakelweg in mm	80 % Tonwert	Rakelweg in mm	100 % Tonwert
0,1028	1,0178	0,1030	1,1738
0,2056	1,3677	0,2059	1,5033
0,3084	1,6242	0,3089	1,782
0,4112	1,8608	0,4119	1,977
0,5140	1,974	0,5148	2,1417
0,7195	2,1587	0,7208	2,4302
0,9251	2,3026	0,9267	2,6156
1,1307	2,4159	1,1326	2,7291
1,3363	2,5802	1,3385	2,8523
1,5419	2,6838	1,5445	2,9759

---

## A.2 Datenblätter

---

### A.2.1 Silikonöle

---

#### Technische Information Technical Information

**QUAX**

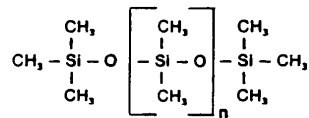
Öle B

Seite 1

### ELBESIL-ÖLE B

ELBESIL-ÖLE B sind Polydimethylsiloxane (PDMS), die in Viskositätseinstellungen von 0,65 bis 100 000 cSt geliefert werden. Sie sind wasserklare Flüssigkeiten mit weitgehender Geruchs- und Geschmacksneutralität.

Durch folgende Formel  
läßt sich die Struktur der  
ELBESIL-ÖLE B veranschaulichen:



Aufgrund der einmaligen Kombination hervorragender Eigenschaften eignen sich ELBESIL-ÖLE B für eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Die wichtigsten Eigenschaften sind:

- Ausgeprägte wasserabstoßende Eigenschaften
- Geringe Temperaturabhängigkeit der Viskosität
- Wärme und Kältebeständigkeit
- Ausgeprägte Oberflächenaktivität
- Hohe Grenzflächenspannung gegen Wasser u. org. Polymere
- Gute dielektrische Eigenschaften über einen breiten Temperatur und Frequenzbereich
- Hohe Kompressibilität
- Chemische und physiologische Indifferenz

#### Daraus ergeben sich folgende typische Anwendungsgebiete:

<b>Trennmittel:</b>	Entformung von Kautschuk- und Kunststoffteilen, einmaliger dünner Auftrag ermöglicht viele Trennvorgänge. Kein Aufbau in den Formen.
<b>Gleitmittel:</b>	Kunststoffe, Gummi, Schaumstoffe, Kunststofflager, Schneidwerkzeuge, Nähgarn erhalten ausgezeichnete Gleiteigenschaften und werden gleichzeitig wasserabweisend.
<b>Antischaum:</b>	Mineral- und Pflanzenöle, sowie viele nichtwässrige Systeme werden durch äußerst geringe Zusätze entschäumt.
<b>Polituren:</b>	Auto- und Möbelpolituren, Schuh- und Bodenpflegemittel werden wasserabstoßend und erhalten einen glatten und glänzenden Film.
<b>Kosmetika:</b>	In Handcremes, Sonnenbräunungsmitteln, Haarspray, und anderen Formulierungen entsteht ein schützender, nicht fettender Film, der gegen wässrige Medien beständig ist, ohne die Hautatmung zu behindern.

---

#### QUAX GMBH

Hindenburgstr. 19  
64853 Otzberg  
Tel: +49 (0)6162 801774  
Fax: +49 (0)6162 809564  
E-Mail: info@quax.de

---

- Hydrauliköle:** Stoßdämpfer, Pumpen, Bremszylinder, Stabilität gegen Scherbeanspruchung, hohe Kompressibilität.
- Dielektra:** Transformatoren, Kondensatoren, Hochspannungsröhren, Kühlmittel für wärmeabgebende Baueinheiten.
- Dämpfungsmedien:** Drehzahlregler, nautische und aeronautische Instrumente, Kreiselkompass, Meßschreiber, Zeitregler, Überlastrelais, Tonabnehmer.  
Nahezu keine Veränderungen bei Temperaturen bis über 200 °C.
- Hydrophobierung:** Textilien, Schichtstoffe, Keramik, Isolatoren, Glas.  
Ausgeprägte Hydrophobie, kein Nährboden für Bakterien und Pilze.

## Eigenschaften der Standardviskositäten

Diese Werte sind nicht zur Aufnahme in Materialspezifikationen bestimmt.

Tabelle I

Viskosität <sup>2</sup> bei 25°C, mm <sup>2</sup> /s	Flammpunkt <sup>3</sup> (DIN 51376) in °C	Tropfpunkt <sup>4</sup> In °C	Dichte <sup>5</sup> bei 25°C g/cm <sup>3</sup>	Viskositäts- temperatur- koeffizient <sup>6</sup>	Ausdehnungs- koeffizient (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> *°C)*10 <sup>-4</sup>
0,65	-1	-68	0,76	0,31	-
1,0	33	< -90	0,82	0,37	-
3,0	> 60	< -90	0,90	0,51	-
5,0	> 130	< -80	0,92	0,55	-
10	> 160	< -80	0,945	0,56	10,0
20	> 200	< -70	0,955	0,575	9,7
50	> 250	-55	0,96	0,59	9,5
100	> 275	-55	0,963	0,59	9,4
200	> 300	-50	0,966	0,595	9,35
350	> 300	-50	0,968	0,595	9,25
500	> 300	-50	0,969	0,60	9,25
1.000	> 320	-50	0,97	0,60	9,2
5.000	> 320	-50	0,97	0,60	9,2
10.000	> 320	-45	0,97	0,60	9,2
12.500	> 320	-45	0,97	0,60	9,2
30.000	> 320	-45	0,97	0,60	9,2
60.000	> 320	-45	0,97	0,60	9,2
100.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2
300.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2
500.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2
1.000.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2
2.000.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2

<sup>1</sup> In dieser Tabelle sind nur Standard-Viskositäten angegeben.  
Es können jedoch Viskositätseinstellungen bis zu 2.500.000 mm<sup>2</sup>/s geliefert werden.

<sup>2</sup> nach ASTM-D-445, Anhang C.

<sup>3</sup> im offenen Tiegel nach ASTM-D-92.

<sup>4</sup> nach ASTM-D-97-39, Abschnitt 5-7. Infolge von Unterkühlungseinflüssen liegen die nach dieser Methode ermittelten Tropfpunkte tiefer als diejenigen Temperaturen bei denen die Silikonöle nach Lagerung bei tiefen Temperaturen über längere Zeit fest werden.

## QUAX GMBH

Hindenburgstr. 19  
64853 Otzberg  
Tel: +49 (0)6162 801774  
Fax: +49 (0)6162 809564  
E-Mail: info@quax.de

# Technische Information Technical Information

**QUAX**

Öle B

Seite 3

Tabelle II

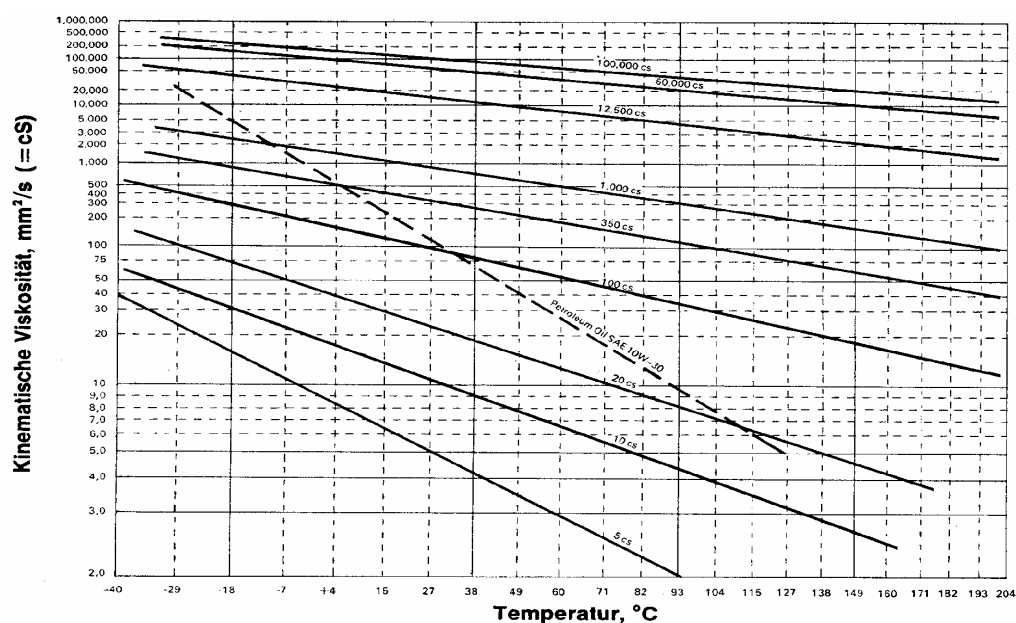
Viskosität <sup>2</sup> bei 25°C, mm <sup>2</sup> /s	Brechungs- index bei 25°C <sup>7</sup>	Oberflächen- spannung bei 25°C, mN/m	Wärmeleit- fähigkeit bei 50°C W/m·K
0,65	1,3750	15,9	0,1004
1,0	1,3880	17,4	0,1046
3,0	1,3970	18,0	0,1172
5,0	1,3960	19,2	0,1155
10	1,3990	20,2	0,1139
20	1,4001	20,6	0,1423
50	1,4020	20,8	0,1506
100	1,4030	20,9	0,1548
200	1,4030	21,0	0,1548
350	1,4035	21,1	0,1590
500	1,4035	21,1	0,1590
1.000	1,4035	21,2	0,1590
5.000	1,4037	21,4	0,1590
10.000	1,4037	21,4	0,1590
12.500	1,4037	21,5	0,1590
30.000	1,4037	21,5	0,1590
60.000	1,4037	21,5	0,1590
100.000	1,4037	21,5	0,1590
300.000	1,4037	21,5	0,1590
500.000	1,4037	21,5	0,1590
1.000.000	1,4037	21,5	0,1590
2.000.000	1,4037	21,5	0,1590

<sup>5</sup> nach ASTM-D-1298.

<sup>7</sup> nach ASTM-D-1218.

<sup>6</sup> Viskositäts-Temperatur-Koeffizient:  $1 - \frac{\text{Viskosität bei } 99^\circ\text{C}}{\text{Viskosität bei } 38^\circ\text{C}}$

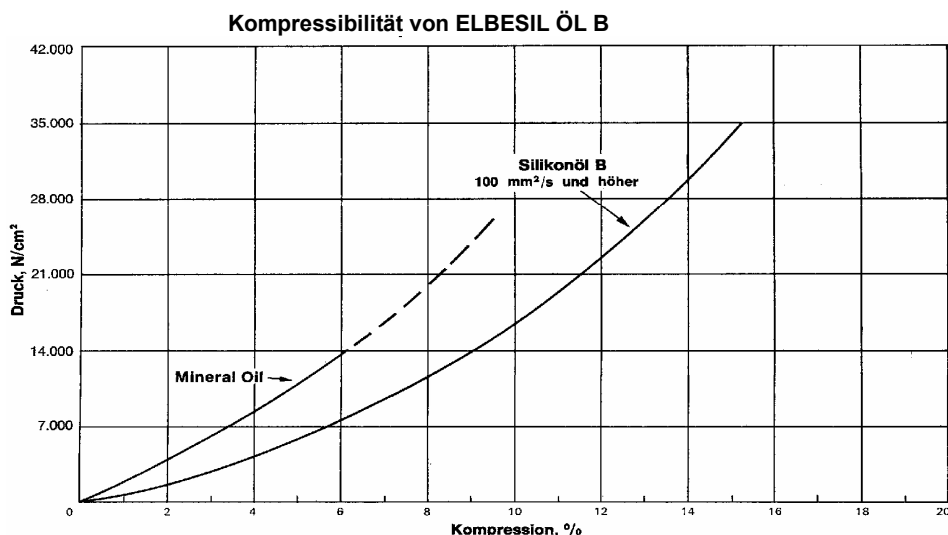
## Viskosität/Temperaturkurve für ELBESIL ÖL B



## QUAX GMBH

Hindenburgstr. 19  
64853 Otzberg  
Tel: +49 (0)6162 801774  
Fax: +49 (0)6162 809564  
E-Mail: [info@quax.de](mailto:info@quax.de)





Die Druckabhängigkeit der Dichte von ELBESIL Ölen B ist groß. Sie nimmt mit steigender Viskosität ab. Die adiabatische Kompressibilität von Ölen mit einer Viskosität > 100 mPa/s ist bei 25°C  $100 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ . Sie nimmt mit steigender Temperatur zu.

#### Dielektrisches Verhalten

Viskosität $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Temp. °C	Dielektrizitätszahl $\epsilon_r$ nach DIN 53483		Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ nach DIN 53483		Spezifischer Durchgangswiderstand $\rho_D$ in $\Omega \cdot \text{cm}$ nach DIN 53482 Messspannung 100 V 1-Minutenwert
		50 Hz	800 Hz	50 Hz	800 Hz	
3	-50	3	2,9	$1 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{15}$
	0	2,8	2,6	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{14}$
	100	2,4	2,3	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{13}$
	200	2,1	2,1	$15,5 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{12}$
20	-50	3	3,0	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{16}$
	0	2,9	2,8	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{15}$
	100	2,4	2,4	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{14}$
	200	2,2	2,2	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{13}$
50	-50	3,1	3,0	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{15}$
	0	3	2,9	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{14}$
	100	2,6	2,4	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{13}$
	200	2,3	2,2	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{13}$
100	-50	3,1	3,0	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{16}$
	0	2,9	2,8	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{15}$
	100	2,5	2,5	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{14}$
	200	2,4	2,2	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{13}$
60 000	-50	3,4	3,4	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{16}$
	0	2,9	2,9	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{15}$
	100	2,7	2,5	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{13}$
	200	2,5	2,3	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{13}$

#### QUAX GMBH

Hindenburgstr. 19  
64853 Otzberg  
Tel: +49 (0)6162 801774  
Fax: +49 (0)6162 809564  
E-Mail: [info@quax.de](mailto:info@quax.de)

#### **Sonder-Viskositäten**

Das Abmischen von ELBESIL ÖL B unterschiedlicher Viskosität gestattet die Einstellung jedes gewünschten Viskositätsgrades. Das Fluid kann zwar in einer Reihe von Standard-Viskositäten geliefert werden; gelegentlich erfordern jedoch bestimmte Anwendungen ein Fluid einer zwischen den Standard-Viskositäten liegenden Viskosität.

Für diesen Fall wenden Sie sich bitte an die QUAX GmbH. Sondereinstellungen der Viskosität sind ohne Probleme möglich und können auch in kleineren Mengen geliefert werden.

#### **Löslichkeit**

Lösungsmittel für sämtliche Typen:	aromatische u. Aliphatische Kohlenwasserstoffe Chlorkohlenwasserstoffe, Äther, Ester, höhere Alkohole, Ketone.
------------------------------------	--

Lösungsmittel für niedrigvisk. Typen bis ca. 20 cSt.:	Aceton, Äthanol, Butanol, Isopropylalkohol, Dioxan.
--	---

#### **Chemische Eigenschaften**

ELBESIL-ÖLE B sind chemisch inerte Stoffe. Sie wirken auf Metalle, wie Eisen, Kupfer, Zinn, Aluminium, Chrom, Nickel, usw. nicht ein. Durch schwache Säuren oder Alkalien werden sie nicht angegriffen. Eine Zersetzung wird jedoch durch konzentrierte Säuren (Schwefel- u. Salpetersäure), aggressive Gase (Chlor) oder konzentrierte Alkalien - besonders in der Wärme - herbeigeführt.

#### **Lagerbeständigkeit**

ELBESIL ÖLE B sind bei sachgemäßer Lagerung unbegrenzt lange mindestens jedoch 12 Monate haltbar. Sie sind auch klimatischen Einflüssen gegenüber unempfindlich.

Die in diesem Merkblatt aufgeführten Daten wurden nach bestem Wissen erstellt und dienen der näheren Beschreibung des Produktes. Verbindliche Rückschlüsse auf bestimmte Eigenschaften oder Anwendungsmöglichkeiten können hieraus nicht gezogen werden. Änderungen behalten wir uns bei technischem Fortschritt vor. Beratungen erfolgen nach bestem Wissen, jedoch unverbindlich. Wir haften nicht wegen Unterlassung einer Beratung.

---

#### **QUAX GMBH**

Hindenburgstr. 19  
64853 Otzberg  
Tel: +49 (0)6162 801774  
Fax: +49 (0)6162 809564  
E-Mail: [info@quax.de](mailto:info@quax.de)

---